

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivona Radelja**

**Split, 2015.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Ivona Radelja**

**Utjecaj različitih razreda drobljenog agregata na  
svojstva poroznog betona**

**Diplomski rad**

**Split, 2015.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

**KANDIDAT:** Ivona Radelja

**BROJ INDEKSA:** 470/2015.

**KATEDRA:** **Katedra za građevinske materijale**

**PREDMET:** Građevinski materijali I

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Utjecaj različitih razreda drobljenog agregata na svojstva poroznog betona

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti svojstva poroznog betona, kao i dosadašnja ispitivanja na takvim vrstama betona. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi uzorke betona koristeći različite razrede drobljenog agregata. U tu svrhu potrebno je pripremiti frakcije agregata 2 - 4, 4 - 8, 8 - 11,2 i 11,2 - 16 mm. Svi uzorci trebaju imati istu količinu veziva i vodovezivni faktor. Na uzorcima svježeg betona potrebno je ispitati konzistenciju "metodom kuglice" a na uzorcima očvrslog betona poroznost, propusnost, vlačnu čvrstoću metodom cijepanja te čvrstoću na pritisak. Za određivanje propusnosti betona treba koristiti dvije metode: metodu padajuće razine stupca vode i metodu stalne razine stupca vode. Eksperimentalno dobivene rezultate potrebno je prikazati i komentirati.

U Splitu, 10.03.2015.

Voditelj Diplomskog rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:  
Prof.dr.sc. Ivica Boko

## **ZAHVALA**

---

*Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Sandri Juradin na strpljenju i pomoći pri izradi diplomskog rada. Hvala svima koji su svojim savjetima, strpljenjem i podrškom pridonijeli kvaliteti ovog rada. Najveće hvala mojoj obitelji na iskazanoj ljubavi i razumijevanju tijekom studiranja.*

# **Utjecaj različitih razreda drobljenog agregata na svojstva poroznog betona**

## ***Sažetak:***

Porozni beton ima značajnu ulogu u tehnologiji građenja. Povećenja korištenja ovakvih specijalnih betona bi značajno doprinijelo unaprijeđenju održive gradnje, ekologiji te održavanju voda čistim. Cilj ovog istraživanja je ispitati svojstva poroznog betona od drobljenog agregata. Napravljeno je osam mješavina poroznog betona, na kojima su ispitana i analizirana sljedeća svojstva: konzistencija, poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća te vlačna čvrstoća cijepanjem. Porozni betoni imaju malu čvrstoću. Razlog tome je što takvi betoni imaju veliku propusnost jer im je većina volumena ispunjena krupnim agregatom. U ovom istraživanju se nastojalo postići optimalan sadržaj pora kako bi se dobila zadovoljavajuća čvrstoća i propusnost.

## ***Ključne riječi:***

Porozni beton, drobljeni agregat, poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća cijepanjem

# **The impact of different grades of crushed aggregate on the properties of porous concrete**

## ***Abstract:***

Porous concrete has a significant role in building technology. Increased use of these types of concrete could significantly contribute to the improvement of sustainable construction, but also to the ecology and maintenance of clean water. The aim of this study is to examine the properties of porous concrete from the crushed aggregate. Eight mixtures of porous concrete were made. After that, they were tested and analyzed by the following characteristics: consistency, porosity, permeability, compressive strength and tensile strength by splitting. Porous concrete has a small strength. The reason for this lies in the fact that these types of concrete have a large permeability because the most of their volume is filled with coarse aggregate. In this study, an attempt was made in order to achieve the optimal content of voids so that sufficient strength and permeability could be obtained.

## ***Keywords:***

Porous concrete, crushed aggregate, porosity, permeability, compressive strength and tensile strength by splitting.

# SADRŽAJ

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1	OPĆENITO O POROZNOM BETONU .....	1
1.2	POVIJESNI RAZVOJ POROZNOG BETONA .....	3
<b>2</b>	<b>AGREGAT.....</b>	<b>4</b>
2.1	UVOD .....	4
2.2	FIZIKALNA SVOJSTVA AGREGTA .....	5
2.2.1	Poroznost i apsorpcija vode.....	5
2.2.2	Šupljine u agregatu i volumna masa agregata .....	6
2.3	GEOMETRIJSKA SVOJSTVA UZORKA AGREGATA.....	7
2.3.1	Volumna koncentracija agregata; šupljine u betonu .....	8
2.3.2	Utjecaj zbijenosti uzorka .....	9
2.3.3	Efekt stijenke i interferencija zrna.....	10
<b>3</b>	<b>DOSADAŠNJA ISPITIVANJA POROZNOG BETONA .....</b>	<b>12</b>
3.1	PRIMJENA POROZNOG BETONA U KOLNIČKIM KONSTRUKCIJAMA ( M. FELJA, K. ČOSIĆ, I. NETINGER).....	12
3.1.1	Uvod .....	12
3.1.2	Projektiranje sastava betonske mješavine .....	12
3.1.3	Ispitivanje uzoraka betona i rezultati ispitivanja.....	13
3.1.4	Zaključak.....	16
3.2	OPTIMALNA MJEŠAVINA ZA PROJEKTIRANJE POBOLJŠANOG PROPUSNOG BETONA- EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE (C. LIAN, Y. ZHUGE).....	17
3.2.1	Uvod .....	17
3.2.2	Materijali .....	17
3.2.3	Prirema uzoraka.....	18
3.2.4	Ispitivanja uzoraka poroznog betona.....	18
3.2.4.1	Jednoosna vlačna i tlačna čvrstoća .....	18
3.2.4.2	Vodopropusnost .....	19
3.2.4.3	Porozitet .....	20
3.2.5	Rezultati ispitivanja uzoraka poroznog betona .....	20
3.2.5.1	Utjecaj agregata .....	20
3.2.5.2	Definiranje optimalne mješavine .....	22

3.2.6 Zaključak.....	24
3.3 UTJECAJ AGREGATA NA STATIČKI MODUL ELASTIČNOSTI POROZNOG BETONA NAPRAVLJENOG OD PORTLAND CEMENTA (J. PITT, L. K. CROUCH, R. HEWITT) .....	25
3.3.1 Uvod .....	25
3.3.2 Materijali .....	26
3.3.3 Rezultati .....	27
3.3.3.1 Utjecaj granulometrijskog sastava agregata .....	30
3.3.3.2 Utjecaj količine agregata .....	30
3.3.3.3 Utjecaj veličine agregata.....	30
3.3.4 Zaključak.....	31
3.4 UTJECAJ VELIČINE AGREGATA I VEZIVNE TVARI NA SVOJSTVA POROZNOG BETONA (TUN CHI FU, W. YEIH, JIANG JHY CHANG, R. HUANG).....	32
3.4.1 Uvod .....	32
3.4.2 Eksperimentalni dio.....	33
3.4.3 Testovi.....	35
3.4.3.1 Porozitet.....	35
3.4.3.2 Jedinična težina.....	35
3.4.3.3 Tlačna čvrstoća .....	35
3.4.3.4 Vlačna čvrstoća savijanjem .....	35
3.4.3.5 Vlačna čvrstoća cijepanjem .....	35
3.4.3.6 Koeficijent vodopropusnosti.....	36
3.4.3.7 Ispitivanje uzoraka u magnezijevom sulfatu .....	36
3.4.4 Rezultati testa i analiza.....	36
3.4.4.1 Jedinična težina.....	36
3.4.4.2 Test propusnosti.....	37
3.4.4.3 Test poroznosti.....	38
3.4.4.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće.....	38
3.4.4.5 Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem .....	38
3.4.4.6 Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem .....	39
3.4.4.7 Ispitivanje uzoraka u magnezijevom sulfatu .....	41
3.4.4.8 Usporedba koeficijenta vodopropusnosti sa poroznosti i tlačnom čvrstoćom	
42	
3.4.5 Zaključak.....	44



<b>4</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA SVOJSTAVA POROZNOG BETONA .....</b>	<b>45</b>
4.1	UVOD U EKSPERIMENTALNI DIO RADA .....	45
4.2	KORIŠTENI MATERIJALI .....	46
4.2.1	Cement .....	46
4.2.2	Agregat .....	49
4.2.3	Voda .....	51
4.2.4	Leteći pepeo .....	51
4.3	IZRADA MJESAVINA POROZNOG BETONA .....	52
<b>5</b>	<b>METODE ISPITIVANJA POROZNOG BETONA .....</b>	<b>62</b>
5.1	ISPITIVANJA SVJEŽEG POROZNOG BETONA .....	62
5.1.1	Ispitivanje konzistencije poroznog betona .....	62
5.2	ISPITIVANJA SVOJSTAVA OČVRSLOG POROZNOG BETONA .....	63
5.2.1	Ispitivanje poroznosti .....	63
5.2.2	Ispitivanje vodopropusnosti .....	63
5.2.3	Ispitivanje tlačne čvrstoće .....	67
5.2.4	Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem .....	68
<b>6</b>	<b>REZULTATI I ANALIZA REZULTATA POROZNOG BETONA .....</b>	<b>70</b>
6.1	REZULTATI ISPITIVANJE SVOJSTVA POROZNOG BETONA U SVJEŽEM STANJU .....	70
6.1.1	Ispitivanje konzistencije „metodom kuglice“ .....	70
6.2	REZULTATI ISPITIVANJE SVOJSTVA POROZNOG BETONA U OČVRSLOM STANJU .....	78
6.2.1	Ispitivanje poroznosti .....	78
6.2.2	Ispitivanje propusnosti .....	88
6.2.3	Ispitivanje tlačne čvrstoće .....	90
6.2.4	Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem .....	92
6.2.5	Veza između poroznosti i propusnosti .....	94
6.2.6	Veza između poroznosti i tlačne čvrstoće .....	95
6.2.7	Veza između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem .....	95
6.2.8	Veza između tlačne čvrstoće i propusnosti .....	96
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>97</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>99</b>

## 1 UVOD

### 1.1 Općenito o poroznom betonu

Beton je složeni građevinski materijal koji se dobije miješanjem veziva (cementa, letećeg pepela, itd.), vode i agregata (šljunka i pijeska). Godišnje se u svijetu proizvodi više od šest milijardi kubičnih metara betona čiji sastav ovisi o vrsti konstrukcije u koju se ugrađuje i o načinu ugradnje [1]. Danas, više nego ikad prije, se koriste posebni betoni – izrađeni po specijalnim sistemima ugradnje i recepturama. Jedan od takvih betona je i porozni beton.

Porozni beton sadrži malo ili gotovo ništa sitnih čestica, a sastoji se uglavnom od krupnog agregata i cementne paste. Rezultat takvog sastava je veća količina pora u rasponu od 15-35% volumena [2]. Zbog izrazite poroznosti propušta vodu, umanjuje buku, smanjuje potrebu za izgradnjom sistema za odvodnju, olakšava pročišćavanje vode i obnavlja zalihe vode u gradovima. Porozni beton može poslužiti kao masa koja može pohraniti značajne količine otjecajne vode. Može pohraniti volumen vode koji je jednak 15-25% njegova volumena [3].



Slika 1.1 Tipični izgled i karakteristike poroznog betona [3].

Porozni beton je pogodan za izgradnju parkirališta, kolnika, prilaza, nogostupa i biciklističkih staza. Također se koristi za izgradnju propusnih baza i rubnih slivnika te bankina. Prednost ovog betona, u odnosu na obični beton, je ta što se može reciklirati. Na taj se način potiče ekološka osvještenost i održivost.

Osnovni nedostatak poroznog betona je čvrstoća. Ispitivanja na poroznom betonu su uglavnom usmjerena na pronalaženje optimalnog sastava kako bi se zadovoljili kriteriji tlačne čvrstoće. Tlačnu čvrstoću je moguće popraviti dodavanjem sitnih čestica agregata (pijesaka) i superplastifikatora. Preporučeni udio pijeska u poroznom betonu kreće se u granicama 7-10% [4]. Porozni beton je skuplji za 10–40% od običnog betona. Međutim, uzmimo u obzir da porozni beton eliminira potrebu za drenažnim cijevima i ostalim konstrukcijama povezanim sa uobičajnim metodama drenaže, pa cijena proizvoda i ne predstavlja toliko problem. Porozni beton zahtjeva nabijanje zemlje tijekom ugradnje, ali ti su radovi potrebni za ugradnju svih tipova kolnika tako da se to i ne može smatrati negativnom stranom poroznog betona. Pore poroznog betona se tijekom vremena mogu začepiti zbog nečistoća uslijed površinskog otjecanja, ali redovito održavanja može održati prvobitnu propusnost ovog tipa betona. Porozni betoni nisu podložni popuštanju ulja kao što je slučaj s asfaltnim kolnicima. [3]

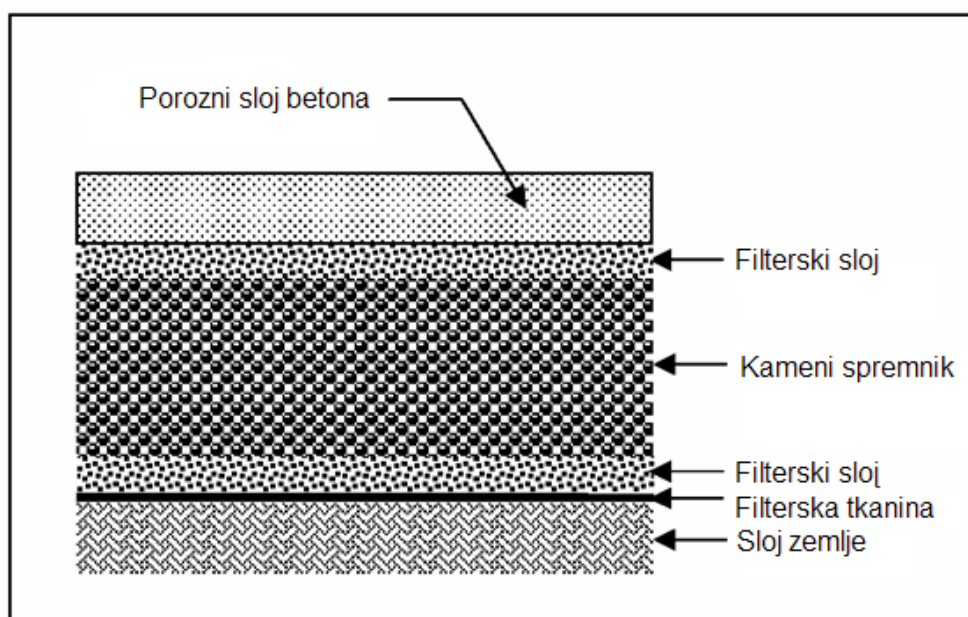


Slika 1.2 Odnos brzine sušenja između asfaltnog kolnika i kolnika od poroznog betona [3]

## 1.2 Povijesni razvoj poroznog betona

Porozni ili propusni beton je poznat već otprilike 50 godina. Koristi se u SAD-u, a nešto manje u Europi. Od 1939. do 1945. godine, razaranja u Drugom svjetskom ratu ostavila su Europu u ogromnim potrebama za novom infrastrukturom. To je potaknulo razvoj novih i prethodno neiskorištenih metoda i materijala za građenje. Među tim materijalima je bio i porozni beton. Njemačka se koristila proizvodnjom poroznog betona zbog nestašice materijala i zbrinjavanja velike količine građevinskog otpada (cigle, šute) [1]. Tako je počelo istraživanje svojstava poroznog betona.

Beton je danas najviše korišten građevinski materijal. Iako danas nisu zastupljeni u velikoj mjeri, betonski kolnici nalaze svoju primjenu u razvijenim zemljama, uglavnom SAD-u te u zemljama Europe (Austrija, Češka, Njemačka, Belgija, itd.). Prije Prvog svjetskog rata u Hrvatskoj se bilježi izgradnja prvih betonskih kolnika. 60-tih godina 20.stoljeća sa izgradnjom betonskih kolnika na hrvatskim cestama je potpuno prestalo [5]. Danas se betonski kolnici izvoze na posebnim mjestima, poput naplatnih postaja na autocestama ili benzinskih crpki. Suvremeni betonski kolnici imaju poboljšane površinske teksture, čime predstavljaju dobro rješenje za smanjenje buke te znatno veću otpornost na proklizavanje. Sve ovo navedeno je izraženo kod kolničkih konstrukcija, čiji je gornji ustroj izveden od poroznog betona. [3]



Slika 1.3 Poprečni presjek kod poroznih betonskih kolnika [3]

---

## 2 AGREGAT

### 2.1 Uvod

Agregat čini približno tri četvrtine volumena betona, pa iz tog razloga i ima veliki utjecaj na svojstva svježeg i očvrslog betona. Agregati za beton se mogu podijeliti na prirodne, umjetno drobljene i specijalne agregate (lagani agregat). [6]

Prirodni agregat nastaje raspadanjem kamenih masiva. Raspadnute komade stijene valjaju potoci pri čemu se dalje drobe i bruse. Iz tog razloga su prirodni agregati jako dobre kvalitete. Prirodni agregat nastaje i djelovanjem ledenjaka koji također valjaju, drobe i bruse komade stijena. Prirodni gregat sa zaobljenim zrnima naziva se i šljunak. Prirodni agregati su povoljniji u pogledu ugradljivosti i obradljivosti. [7]

Umjetno drobljeni agregat se dobiva drobljenjem stijena u drobilicama. Stariji naziv je tucanik, jer se prvobitno drobljenji gregat dobivao ručnim zbijanjem, odnosno tucanjem većih komada kamena. [7] Drobljeni agregat je uobičajno ujednačenijeg mineralnog sastava i vrlo povoljne hrapave površine, koja osigurava dobru prionjivost cementnog kamena. [8]

Lagani agregati se dobivaju od ekspandirane i pečene gline ili škriljca i perlita. Neki lagani agregati su otpadni proizvodi ili sekundarne sirovine u industriji. To je npr. ekspandirana zgura, pluto i drobljena opeka. [6]

Prema tipu stijena, agregati mogu biti vulkanskog, sedimentnog i metamorfnog podrijetla. Kod prirodnih agregata najčešće su zastupljena sva tri tipa, a kod drobljenog agregata najčešće je to po mineralnom sastavu drobljena stijena. [6]

Svojstva agregata bitno utječu na svojstva betona, a konačna ocjena o prikladnosti agregata se treba donositi na osnovu ispitivanja betona. Vještim projektiranjem sastava betona, pri čemu se koriste različiti dodaci, pravilan izbor cementa, i drugim postupcima proizvodnje betona, mogu se postići zadovoljavajuća svojstva. [6]

Krupna zrna agregata čine skelet betona preko kojeg se, zbog znatno veće krutosti od krutosti cementnog kamena, prenose sile. Sitna zrna agregata zajedno sa cementnom pastom čine mort. Premda je uloga krupnih zrna i pijeska u svježem i očvrslom betonu različita, oni se pri ispitivanju svojstava agregata i projektiranju sastava betona promatraju zajednički. [6]

## **2.2 Fizikalna svojstva agregata**

### **2.2.1 Poroznost i apsorpcija vode**

Poroznost agregata, propusnost za vodu i apsorpciju vode su bitna svojstva koja utječu na prionljivost cementnog kamena i agregata u betonu, otpornost betona na djelovanje mraza te kemijsku i erozijsku otpornost betona. Propusnost vode ovisi o ukupnom volumena pora te njihovoj povezanosti.

Obzirom na sadržaj vlage, razlikuju se četiri stanja agregat :

- Potpuno suh agregat- agregat koji je sušen na temperature 100°C do 110°C do konstatne težine.
- Prirodno suh agregat- agregat koji sadži manju količinu vlage u agregatu, ali je suhe površine.
- Zasićen, površinski suh agregat (ZPS)- agregat koji na površini nema slobodne vlage, ali su sve pore ispunjene vodom.
- Vlažan agregat- agregat kojim su pore ispunjene vodom te na površini ima slobodne vode. [6]

Ako se prirodno suh agregat dozira u betonsku mješavinu on će postepeno apsorbirati dio vode iz cementne paste, i time dolazi do smanjenja fluidnosti betona. Prema tome, kod proračuna betonske mješavine treba u svakom slučaju, dio vode koju upije agregat oduzeti od ukupne količine vode za betonsku mješavinu, tako doći do efektivnog vodocementnog faktora, koji je mjerodavan za obradljivost, čvrstoću, trajnost i druga svojstva očvrsllog betona.[6]

### 2.2.2 Šupljine u agregatu i volumna masa agregata

Masa agregata u nekoj posudi zavisit će od gustoće odnosno volumena mase zrna agregata, ali i od količine zrna između zrna agregata. Količina šupljina ovisi o granulometrijskom sastavu, obliku i teksturi zrna, te o stupnju zbijenosti. Šupljikavost agregata se definira kao:

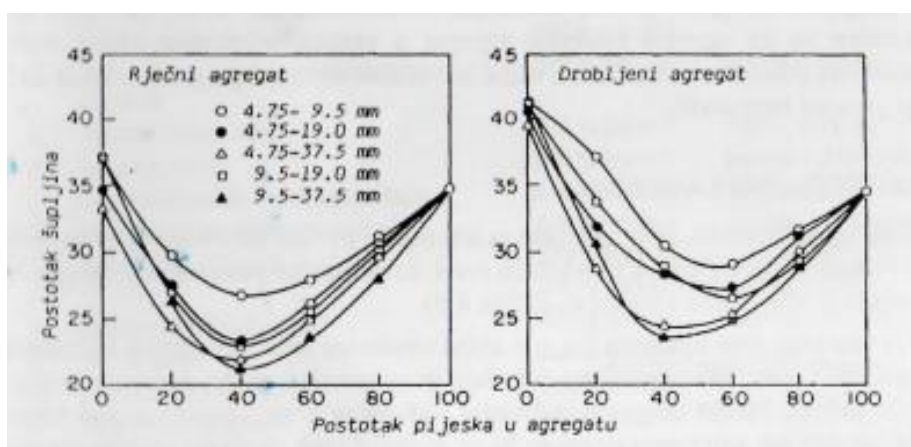
$$\bar{s} = 100 * (\rho_{zps} - \rho_s) (\%),$$

gdje je:

$\rho_{zps}$  - volumna masa zbijenog zasićenog, površinski suhog agregata

$\rho_s$  - volumna masa zbijenog agregata

Nepravilan oblik zrna i hrapavost površine agregata utječe tako da se šupljikavost povećava. Na slici 2.1. prikazani su eksperimentalni podaci o tome, kako se mijenja šupljikavost agregata za različite omjere miješanja pijeska i krupnih zrna agregata. [6]



Slika 2.1 Eksperimentalni podaci o šupljikavosti agregata zavisno o omjeru pijeska i krupne frakcije [6]

### 2.3 Geometrijska svojstva uzorka agregata

Međusoban odnos volumena svih zrna i volumena svih šupljina definira se na sljedeći način :

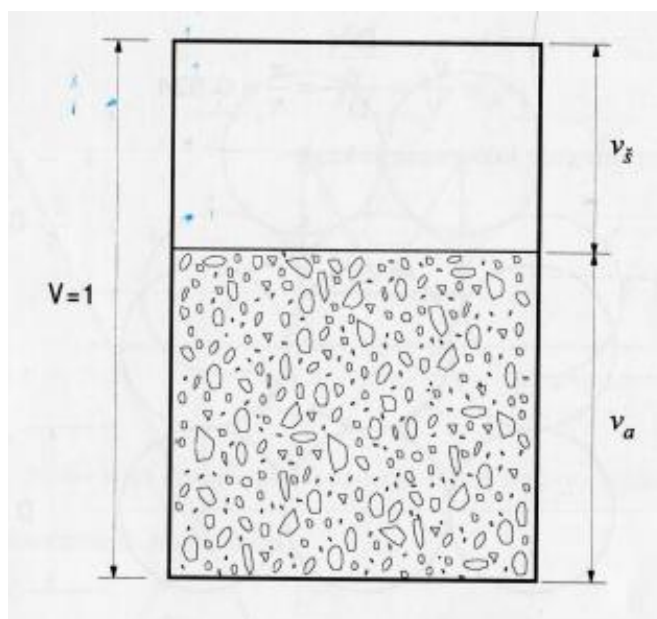
$$V = V_a + V_{\text{š}},$$

gdje je:

$V$ - volume uzorka,

$V_a$ - volumen kamene mase zrna,

$V_{\text{š}}$ - volume šupljina između zrna. [7]



Slika 2.2 Prostorni model uzorka agregata [7]

Dijeljenjem gornjeg izraza s  $V$  dobije se :

$$\frac{V_a}{V} + \frac{V_{\text{š}}}{V} = 1$$

ili

$$v_a + v_{\text{š}} = 1,$$

gdje je:

$V_a$ - volumen koncentracija agregata,



$V_s$ - volumna koncentracija šupljina.

Ako se pretpostavi da material zrna nema pora, onda  $v_a$  odgovara relativnoj gustoći uzorka, a  $V_s$  poroznosti uzorka. [7]

Iz ovog izraza vidimo da se volumna koncentracija šupljina smanjuje kako se volumna koncentracija agregata povećava.

### 2.3.1 Volumna koncentracija agregata; šupljine u betonu

Jedna normalna frakcija drobljenog agregata, primjerice 4-8 mm ima volumnu koncentraciju agregata 0,57. Zbog tako male volumne koncentracije u betonu ostaje dosta šupljina. Ukoliko se za pripremu betona upotrijebi više od jedna frakcija agregata, povećava se volumna koncentracija agregata a sadržaj pora se smanjuje. [7]

U donjem dijelu tablice 2.1 su prikazane volumne koncentracije mješavina više razreda. Ako mješavina sadrži više od dva susjedna razreda njena volumna koncentracija se povećava a sadržaj šupljina se smanjuje.

Tablica 2.1 Volumne koncentracije frakcija agregata [7]

Frakcija, mm	Broj razreda	Volumna koncentracija, $v_a$
0.125 - 0.25	1	0.56
0.5 - 1	1	0.56
1 - 2	1	0.57
4 - 8	1	0.57
4 - 31.5	3	0.62
0.125 - 4	5	0.69
0.125 - 8	6	0.73

U tablici 2.2 su prikazane maksimalne volumne koncentracije mješavine zrna i odgovarajući omjeri miješanja komponenti. Vidljivo je da volumna koncentracija zrna  $v_a$ , tim veća, što je veća razlika u veličini zrna sitne i krupne komponente.[7]

Tablica 2.2 Maksimalne volumne koncentracije mješavina frakcija agregata [7]

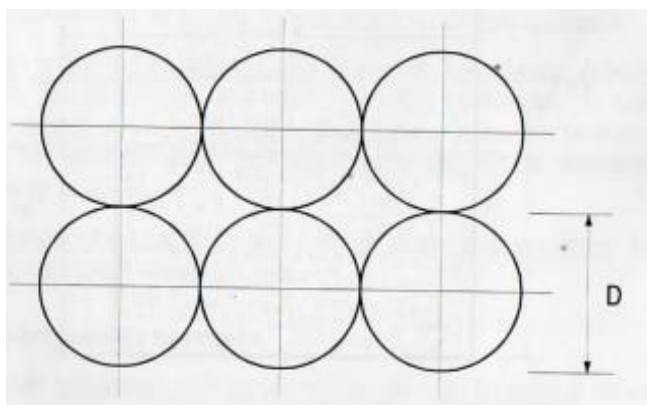
Red. br.	Sitna komponenta, mm	Krupna komponenta, mm	Diskontinuitet, broj razreda	1 : x	$v_n$
1	0.125 - 0.25	0.25 - 0.5	0	1 : 1.41	0.60
2	0.125 - 0.25	0.5 - 1	1	1 : 1.51	0.66
3	0.125 - 0.25	1 - 2	2	1 : 1.65	0.71
4	0.125 - 0.25	4 - 8	4	1 : 2.10	0.78

### 2.3.2 Utjecaj zbijenosti uzorka

Zbijanjem slobodnog nasutog uzorka povećava se koncentracija agregata. Povećanje koncentracije agregata traje dok se ne postigne maksimalna volumna koncentracija agregata. Daljnjim zbijanjem, čak i uz primjene veće sile i energije, taj parametar ostaje konstantan.

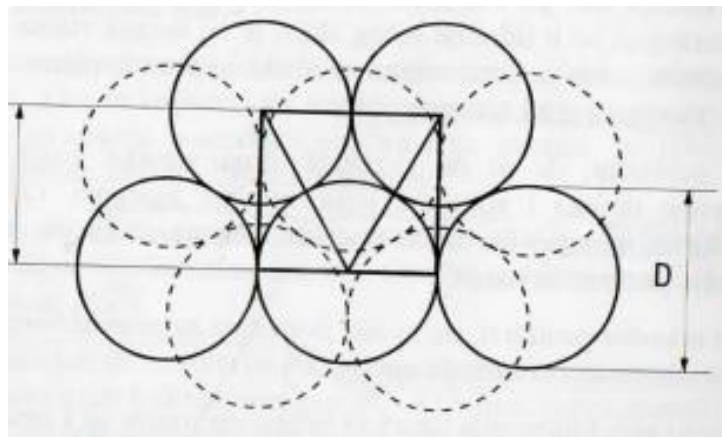
Agregatni skelet tako zbijenog uzorka je stabilan, jer za ponovo razmicanje zrna potrebno je upotrijebiti dovoljno veliku silu. Pri svakoj manjoj zbijenosti, agregatni skelet je nestabilan, jer je za pomicanje zrna potrebna znatno manja sila. [7]

Na slici 2.4 je prikazan jedan od načina slaganja kugli. Ovakva prostorna rešetka lako se deformira pod utjecajem vanjske sile. Ako se potisne samo jedan sloj cijeli sloj kugli, te se kugle otkotrljaju u udoline nižeg sloja. Isti poremećaj se proširi na sve ostale slojeve, te se kugle cijelog uzorka slože u manji volumen. Stoga se volumna koncentracija kugli poveća, a volumna koncentracija šupljina smanji. [7]



Slika 2.4 Sustav s najmanjom volumnom koncentracijom kugli (tlocrt i presjek) [7]

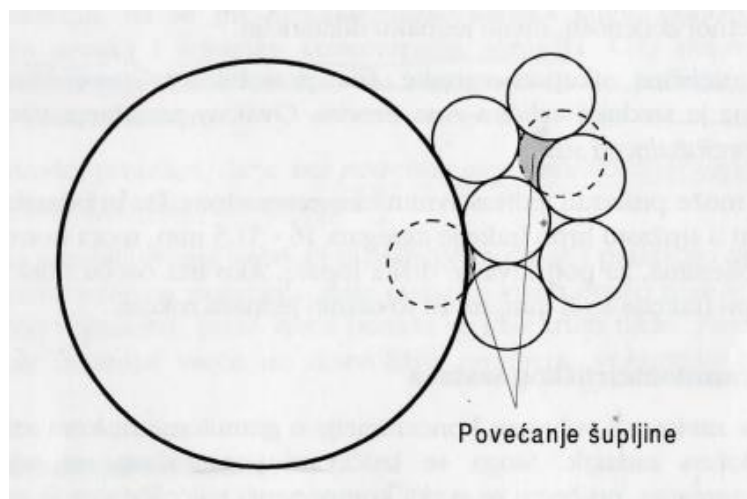
Maksimalna koncentracija kugli nastaje ako se slože prema slici 2.5. Kugle višeg sloja označene su crtkanao. Da bi se pomakla jedna kugla, potrebno je razbiti cijelu prostornu rešetku, tj. pomaknuti sve kugle u uzorku. Pri tome dolazi do povećanja volumena cijelog uzorka, što rezultira smanjenjem volumne koncentracije kugli. [7]



Slika 2.5 Sustav kugli s najmanjom volumnom koncentracijom šupljina (tlocrt) [7]

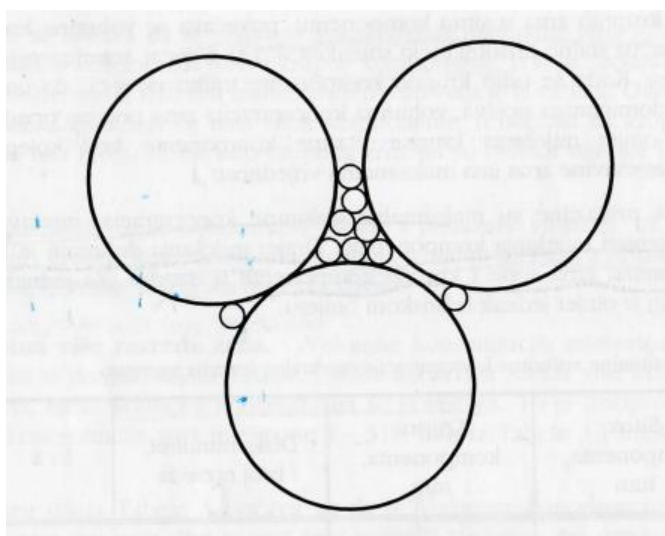
### 2.3.3 Efekt stijenke i interferencija zrna

Ako se u uzorak sitne komponente umetne mali broj zrna krupne komponente, volumen krute tvari u uzorku mora se povećati, jer je određeni volumen sitne komponente sa šupljinama zauzelo krupno zrno bez šupljina. Međutim, oblik površine krupnog zrna ovisi o rasporedu susjednih sitnih zrna, tako da se ona ne mogu rasporediti onako kako bi se rasporedili u beskonačnom prostoru. Na slici 2.6 je vidljivo da je šupljina između dva sitna zrna i krupnog zrna je veća nego između tri sitna zrna koja se međusobno dodiruju. Sve skupine od po tri zrna ne mogu se međusobno dodirivati pa je na takvim mjestima šupljina veća. Slično se događa u ostalim redovima sitnih zrna oko krupnog zrna. Ova pojava se naziva efekt stijenke. Stijenku ovdje predstavlja površina krupnog zrna. Umetanjem krupnih zrna u sitnu komponentu povećava se volumenska koncentracija mješavine, ali je to povećanje samanjeno zbog efekta stijenke. Smanjenje je tim veće, što je više krupnih zrna u mješavini. [7]



Slika 2.6 Efekt stijenke [7]

Ako se u šupljine između zrna krupne komponente smjeste sitna zrna koja su manja od šupljine, volumen krute tvari u uzorku se povećava, a time i volumna koncentracija agregata. Skupine od po 3 zrna neće se više međusobno dodirivati, jer to ometaju sitna zrna. Interferencija zrna je pojava pri kojoj se kruta tvar određenog broja krupnih zrna zamijeni istim volumenom sitnih zrna sa šupljinama. Dakle, umetanjem sitnih komponenti povećava se volumna koncentracija mješavine, ali je to povećanje smanjeno zbog interferencije zrna. Smanjenje je tim veće, što je više sitnih zrna u mješavini. [7]



Slika 2.7 Interferencija zrna [7]

### 3 DOSADAŠNJA ISPITIVANJA POROZNOG BETONA

#### 3.1 Primjena poroznog betona u kolničkim konstrukcijama

( M. Felja, K. Ćosić, I. Netinger)

##### 3.1.1 Uvod

U radu je dan pregled svojstava poroznog betona te su prikazane prednosti njegove upotrebe u kolničkim konstrukcijama. Danas se betonski kolnici kod nas izvode samo na posebnim mjestima, poput naplatnih postaja na autocestama ili benzinskih crpki. Iako kod nas nisu previše zastupljeni, betonski kolnici se dosta primjenjuju u razvijenima zemljama Europe te u SAD-u.

Sve češća je upotreba poroznog betona u kolničkim konstrukcijama čime se postiže dobro rješenje za smanjenje buke te znatno veću otpornost na proklizavanje. Poroznost ovakvog betona se kreće između 11-35%. Veliki udio pora negativno utječe na čvrstoću poroznog betona. Tlačna čvrstoća betona kreće se u rasponu od 20-30 MPa. Tlačnu čvrstoću moguće je poboljšati uporabom sitnih čestica agrergata (pijeska), silikatne prašine te dodatkom superplastifikatora. Udio pijeska u poroznom betonu kreće se u granicama 7-10% ukupne mase agregata, količina cementa za kubni metar betona iznosi  $270-415 \text{ kg/m}^3$ , a vodocementni faktor 0,2-0,45.

##### 3.1.2 Projektiranje sastava betonske mješavine

U radu su pripremljene dvije mješavine poroznog betona i mješavina referentnog betona koja se uobičajno koristi za izradu betonskih konstrukcija, te se uspoređuju njihova svojstva:

- Konzistencija
- Tlačna i vlačna čvrstoća
- Poroznost i gustoća
- Dinamički modul elastičnosti
- Propusnost

Pri izradi betonskih mješavina korišten je dolomit frakcioniran u frakcijama 0-4 mm, 4-8 mm te 8-16 mm. Gustoća dolomita je iznosila  $2,75 \text{ kg/dm}^3$ , a pijeska  $2,65 \text{ kg/dm}^3$ . U svim mješavinama korišten je cement CEM II/A-M (S-V), gustoće  $3,0 \text{ kg/dm}^3$ . Superplastifikator koji je korišten u mješavini je na bazi karboksilnih eter polimera.

Tablica 3.1 Sastav betonskih mješavina [5]

Mješavina	M1	M2	M3
Cement (kg)	350	280	300
Voda (kg)	115,5	92,4	99
v/c	0,33	0,33	0,33
Superplastifikator (kg)	3,5	2,8	-
Agregat ukupno (kg)	2034	1813,1	1783,7
Pijesak 0-2 mm (kg)	-	181,3	178,4
Agregat 0-4 mm (kg)	813,6	-	-
Agregat 4-8 mm (kg)	610,2	815,9	1070,2
Agregat 8-16 mm (kg)	610,2	815,9	535,1

Referentna mješavina betona (M1) je uobičajna mješavina za izradu betonskih kolnika. Sadržava sve tri frakcije agregata u omjerima 0-4/4-8/8-16=40:30:30, 350 kg cementa u kubnom metru betona te 1% superplastifikatora zbog poboljšanja obradivosti.

Mješavina poroznog betona (M2) je projektirana s izrazitom malom količinom cementa (280 kg), dodatkom superplastifikatora od 1% te dominantno krupnim agregatom (omjer 4-8/8-16=45:45). Također je dodano 10% pijeska.

Kod mješavine poroznog betona (M3) povećana je količina cementa na 300 kg, no superplastifikator nije korišten. Korišten je dominantno krupni agregat (omjer 4-8/8-16=60:30).

Sve tri mješavine su projektirane s istim vodocementnim faktorom,  $w/c=0,33$ .

### 3.1.3 Ispitivanje uzoraka betona i rezultati ispitivanja

Na svježem betonu ispitana je konzistencija pojedine mješavine betona.

Tablica 3.2 Rezultati ispitivanja konzistencije betona [5]

Mješavina	Konzistencija po metodi slijeganja (cm)
M1	0,0
M2	1,5
M3	1,0

Za potrebe ispitivanja tlačne čvrstoće израđene su 3 kocke brida 15cm.

Za ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem i dinamičkog modula elastčnosti израđene su 3 prizme dimenzija 10 x 10 x 40 cm.

Uzorci za ispitivanje propusnosti израđeni su ugradnjom svježeg betona u nepropusnu plastičnu cijev kojoj je namjera osigurati propusnost vode isključivo u smjeru izvodnice valjka. Propusnost vode je određena mjerenjem brzine prolaska volumena vode od 1l kroz valjak.

Poroznost uzorka je određena računski iz gustoće i obujamske gustoće uzorka betona.

Dinamički modul elastčnosti израčunat je iz brzine prolaza ultrazvučnog impulse ( $v$ ), uz pretpostavku da Poissonov koeficijent ( $\mu$ ) iznosi 0,22 i uz gustoću očvrslog betona ( $\rho$ ) prema formuli:

$$E_{din} = \frac{v^2 \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} [GPa],$$

Nakon jednog dana starosti, uzorci betona su izvаđeni iz kalupa (s izuzetkom uzorka za mjerenje propusnosti) te potopljeni pod vodu gdje su ostavljeni do 28. dana starosti.



Slika 3.1 Uzorci očvrslog betona, redom: M1, M2, M3 [5]



Tablica 3.3 Rezultati ispitivanja očvrsllog betona [5]

Mješavina/Svojstva očvrsllog betona	M1	M2	M3
Tlačna čvrstoća (MPa)	69,5	38,1	24,1
Vlačna čvrstoća savijanjem (MPa)	9,7	7,6	4,9
Gustoća očvrsllog betona (kg/m <sup>3</sup> )	2508	2404	2349
Poroznost (%)	4	7	12
Brzina prolaza ultrazvučnog impulsa (m/s)	5357	5394	4688
Dinamički modul elastičnosti (GPa)	70,9	66,0	51,3

Rezultati ispitivanja pokazuju da mješavina poroznog betona M2 ima za 45,2% manju tlačnu čvrstoću nego referentna mješavina M1. U odnosu na mješavinu poroznog betona M3, mješavina M2 ima veću tlačnu čvrstoću, što je za očekivat s obzirom da se s povećanjem poroznosti smanjuje tlačna čvrstoća. Mješavina M3 ima manju vlačnu čvrstoću betona u odnosu na mješavinu M2, dok vlačna čvrstoća mješavine M2 manja nego kod referentnog betona M1. Svojom vlačnom čvrstoćom beton mješavina M3 zadovoljava uvjetima za ugradnju u kolničke konstrukcije izloženu teškom prometnom opterećenju, a mješavina M2 vrlo teškom prometnom opterećenju. Svojom tlačnom čvrstoćom porozni beton M2 zadovoljava uvjetima za gradnju u kolničke konstrukcije izložene teškom prometnom opterećenju, dok mješavina M3 uopće ne zadovoljava uvjetima koji su prikazani u tablici 3.4.

Tablica 3.4 Namanja 28-dnevna čvrstoća prema OUT za radove na cesti [5]

Predviđeno prometno opterećenje	Zahtijevani razred tlačne čvrstoće (N/mm <sup>2</sup> )	Zahtijevana vlačna čvrstoća savijanjem (N/mm <sup>2</sup> )
Vrlo teško	35/45	5,0
Teško	30/37	4,5
Ostalo	25/30	4,0

Poroznost mješavine M2 iznosila je svega 7%, time se takav beton ne svrstava u kategoriju poroznih betona. Ovako mala poroznost je posljedica dodavanja superplastifikatora u mješavinu.

Propusnost betona je je ispitana na valjcima njegovanim pod vodom 28 dana. Mjerenjem propusnosti je vidljivo da postoji jasna veza između propusnosti i poroznosti.



Tablica 3.5 Rezultati ispitivanja propusnosti [5]

Mješavina	Vrijeme procjeđivanja (sek)	Propusnost (L/min/m <sup>2</sup> )
M1	0,0	0,0
M2	203,0	45,1
M3	50,0	152,5

### 3.1.4 Zaključak

U radu je dan pregled svojstava poroznog betona te prednosti njegove uporabe u kolničkim konstrukcijama. Napravljene su dvije mješavine poroznog betona i referentna mješavina betona uobičajno korištena za izradu betonskih kolničkih konstrukcija. Mješavina M2 sa manjim udjelom cementa i dodatkom superplastifikatora nije zadovoljila najmanjoj zahtjevanoj poroznosti i propusnosti za porozne betone. Mješavina M3 s većim udjelom cementa i bez dodatka superplastifikatora ocijenjena je kao porozni beton na temelju udjela pora i propusnosti, no svojom tlačnom čvrstoćom nije zadovoljila uvjete propisane u OUT za radove na cesti. Stoga će se vršiti daljnja istraživanja za poboljšanje tlačne čvrstoće betona.

Također, za potpunu ocjenu mogućnosti uporabe poroznog betona u kolničkim konstrukcijama trebalo bi uključiti i ispitivanje otpornosti na trošenje, trajnosti na cikličko smrzavanje i odmrzavanje te apsorpciju buke.

## 3.2 Optimalna mješavina za projektiranje poboljšanog propusnog betona-eksperimentalno istraživanje (C. Lian, Y. Zhuge)

### 3.2.1 Uvod

Trenutni prirodni resursi sve se više konzumiraju zbog brze urbanizacije i razvoja građevinske djelatnosti, tako da se istražuju različite strategije s kojima bi se zaštitio prirodni ekosustav u svijetu. Sve se više istražuju propusni kolnici načinjeni od poroznog betona. Propusni kolnik, zbog visoke poroznosti i propusnosti, smatra se kao alternativa u odnosu na tradicionalne nepropusne tvrde pločnike. Jedan od razloga korištenja poroznih kolnika je i povoljan utjecaj na okoliš.

Porozni beton ima malu čvrstoću. Razlog tome je što takav beton ima veliku poroznost jer je većina volumena ispunjena krupnim agregatom, te se koristi tanki sloj cementne paste.

Cilj ovog istraživanja je poboljšati tlačnu čvrstoću poroznog betona, a da se pri tom ne smanji propusnost, tako da bi bio u mogućnosti prihvatiti veće prometno opterećenje.

### 3.2.2 Materijali

Tijekom eksperimentalnih istraživanja definirane su dvije faze. U prvoj fazi korištene su tri različite vrste krupnog agregata, bez drugih dodataka. U drugoj fazi je dodan pijesak i silikatna prašina za poboljšanje svojstava poroznog betona. Druga faza temelji se na rezultatima prve faze.

U svakoj mješavini korišten je portland cement. Kao primarni sastojak koristi se krupni agregat, i to tri tipa: kvarcit, dolomit i vapnenac. Korištene su magmatske stijene jer one imaju veću čvrstoću. U tablici 3.6 su prikazani geološka i mehanička svojstva pojedine stijene.

U drugoj fazi dodaje se silikatna prašina i sitna zrna agregata (prašina) što rezultira povećanjem vezivnog područja između agregata i cementa te se time poboljšava čvrstoća i trajnost betona.

Tablica 3.6 Geološka i mehanička svojstva agregata [9]

Aggregate	Flakiness Index (%)	Mean water absorption (%)	Los Angeles Abrasion value (%)	Dry strength (KN)
Type A	21	2.8	27	163
Type B	35	0.8	15	225
Type C	15	0.3	38	74

Type A: quartzite; type B: dolomite; type C: limestone.

### 3.2.3 Prirema uzoraka

Prvo se vrši prosijavanje agregata. Nakon toga agregat se ispire pomoću vode iz slavine te se na jedan dan ostavlja u pećnici na sušenju. Zatim se vrši miješanje, te lijevanje u kalupe i zbijanje. U ovom istraživanju koriste se dvije metode zbijanja:

- Pomoću čekića
- Pomoću vibracijskog stola

### 3.2.4 Ispitivanja uzoraka poroznog betona

Uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 sata, označeni i izvagani. Ispitivanja se vrše nakon 7 i 28 dana.

#### 3.2.4.1 Jednoosna vlačna i tlačna čvrstoća

Tlačna i vlačna čvrstoća ispituje se na uzorcima valjka 100 x 100 x 470 mm na čije se krajeve stavlja sumporna zaštita ("kapica"). Sumporna zaštita se koristi za uzorke s hrapavom površinom dok se gumena zaštita postavlja na klasične betonske uzorke s glatkom površinom.



Slika 3.2 Ispitivanje vlačne čvrstoće [9]

### 3.2.4.2 Vodopropusnost

Vodopropusnost se definira kao brzina prolaska vode kroz uzorak poroznog betona izražena u milimetrima po sekundi (mm/sec)

Porozni beton ima znatno veću propusnost od uobičajnog betona. Za ispitivanje vodopropusnosti koristi se cilindrična plastična cijev sa zatvorenim dnom.

Brzina vodopropusnosti je definirana sljedećim izrazom :

$$K = \frac{aL}{At} \times \ln \frac{h_1}{h_2}$$

gdje je :

k- koeficijent propusnosti [mm/s],

a- površina cilindrične cijevi [mm<sup>2</sup>],

A- površina uzorka [mm<sup>2</sup>],

L- duljina uzorka [mm],

t- vrijeme potrebno da voda dođe od razine h<sub>1</sub> do razine h<sub>2</sub> [mm/s].



Slika 3.3 Ispitivanje vodopropusnosti poroznog betona [9]

### 3.2.4.3 Porozitet

Mjerenje poroziteta vrši se na uzorcima starim 28 dana. Uzorak je osušen na 110 °C te je ostavljen da se ohladi. Dimenzije uzoraka su mjerene u suhom satnju i određen je ukupni volume uzorka ( $V_T$ ) koji uključuje krutu tvar i šuplju komponentu uzorka. Zatim uzorak stavimo u posudu s vodom te ga nakon 24 sata iz nje izvadimo. Na temelju poznatog početnog i završnog nivoa vode u posudi, definiramo težinu vode te dobijemo njen volume ( $V_C$ ) iz uvijeta  $1\text{g} = 1\text{cm}^3$ .

Porozitet uzorka poroznog betona se izračuna iz formule :

$$P(\%) = \frac{V_T - V_C}{V_T} \times 100\%$$

gdje je :

P- porozitet,

$V_T$ - volumen šuplina u uzorku,

$(V_T - V_C)$  - volumen praznog prostora.

### 3.2.5 Rezultati ispitivanja uzoraka poroznog betona

#### 3.2.5.1 Utjecaj agregata

U ovom istraživanju korištene su tri vrste agregata različite veličine zrna i gradacije. Ista veličina zrna koristila se za sva tri tipa agregata (A1, B1, C1) kao referenca.

Tablica 3.7 Raspodjela veličine agregata [9]

Sieve size (mm) Mix number	16	13.2	9.5	6.7	4.75	2.36	1.18
Passing percentage by mass (%)							
<i>Type A</i>							
A1	100	100	100	0	0	0	0
A2	100	100	100	30	0	0	0
A3	100	100	90	30	0	0	0
<i>Type B</i>							
B1	100	100	100	0	0	0	0
B2	100	100	100	30	0	0	0
B3	100	100	90	30	0	0	0
<i>Type C</i>							
C1	100	100	100	0	0	0	0
C2	100	100	100	30	0	0	0
C3	100	100	90	30	0	0	0

Tablica 3.8 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće [9]

Curing time (days)	Compressive strength (MPa)						
	Quartzite		Dolomite			Limestone	
	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2
7	11.6	13.0	15.0	16.0	14.3	14.3	13.5
28	11.8	15.5	15.8	19.0	15.5	15.5	14.0

Tablica 3.9 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće [9]

Curing time (days)	Flexural strength (MPa)			
	Quartzite		Dolomite	
	A3	B2	B3	C3
7	1.5	2.9	1.7	1.5
28	1.6	3.0	1.9	1.5

Dolomit je imao najbolju tlačnu čvrstoću nakon 7 i 28 dana, nakon njega slijedi vapnenac. Kvarcit je postigao najmanju čvrstoću (tablica 3.8).

Tablica 3.9 pokazuje da uzorci napravljeni od dolomita imaju najbolju vlačnu čvrstoću. Ovim ispitivanjem je definirano da na vlačnu čvrstoću agregata utječe tip agregata, oblik zrna i tekstura samog agregata. Dolomit, u odnosu na kvarcit i vapnenac, se pokazao kao najbolji tip agregata za izradu poroznog betona.

Tablica 3.10 Rezultati ispitivanja propusnosti [9]

Permeability (mm/s)						
Quartzite		Dolomite			Limestone	
A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2
27.47	13.67	19.87	8.51	14.78	13.27	15.99

Mjerenje propusnosti je provedeno nakon 28 dana. Kvarc s jednom veličinom agregata ima najbolju propusnost. Iz tablice 3.10 se vidi da uzorci sa manjom veličinom agregata imaju manju propusnost (izuzev je vapnenac). Međutim, sva tri tipa agregata su pokazali dobru propusnost.

### 3.2.5.2 Definiranje optimalne mješavine

U prvoj fazi ispitivanja dolomit se pokazao kao najbolji agregat za izradu poroznog betona. Tlačna čvrstoća je uzeta kao glavni kriterij. U drugoj fazi ispitivanja istražuje se utjecaj kemijskih dodataka i sitnog agregata na tlačnu čvrstoću poroznog betona.

Tablica 3.11 Svojstva poroznog betona s dodatkom aditiva [9]

Batch No.	Aggregate size	Water to cement ratio	Fine aggregate	SF (%)	SP (%)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	7 days compressive strength (Mpa)	28 day compressive strength (Mpa)	Porosity (%)	Permeability (mm/s)
B2	9.5–4.75	0.36	0	0	0	1926	16.0	19.0	16.6	8.51
B4	9.5–4.75	0.36	0	10	0	2012	17.0	22.0	13.2	6.13
B5	9.5–4.75	0.28	0	7	0.8	2079	22.0	24.3	16.0	12.64
B6	9.5–4.75	0.32	S1	7	0.8	2140	28.5	30.0	9.0	5.39
B7	9.5–4.75	0.36	S2	7	0.8	2248	25.8	33.2	7.50	3.98

S1: fine dolomite particles; S2: quarry sand.

Tablica 3.11 pokazuje da uzorci B4, B5, B6 i B7 napravljeni s aditivima imaju veću čvrstoću od uzorka B2 napravljenog bez aditiva. U ovom istraživanju se koristila silikatna prašina koja pozitivno utječe na tlačnu čvrstoću poroznog betona. Ali tehnički gledano, kada dodajemo silikatnu prašinu, potrebno je dodati veću količinu vode kako bi mješavina zadržala svoju obradivost. Dakle, prednost korištenje silikatne prašine nije postignuta bez dodavanja drugih kemijskih primjesa.

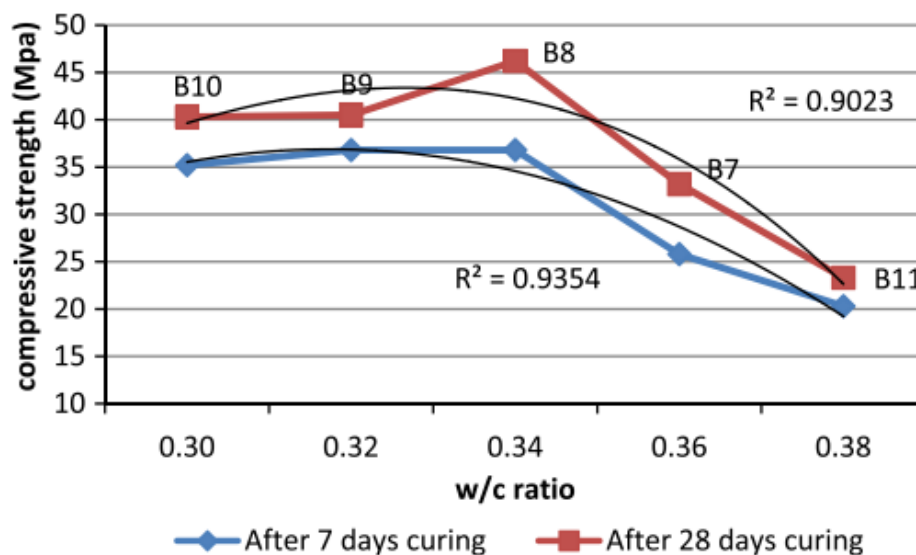
Kroz niz pokušaja, utvrđeno je da dodavanje male količine superplastifikatora utječe na mješavinu koja sadrži silikatnu prašinu te poboljšava njenu kvalitetu izrade i tlačnu čvrstoću.

Nadalje, uz pomoć superplastifikatora i silikatne prašine, može se upotrijebiti fini agregat kako bi mješavina poroznog betona postigla još veću tlačnu čvrstoću. U ovom istraživanju se pokazalo se da je drobljeni pijesak (S2) učinkovitiji od upotrebe sitnih čestica dolomita (S1).

Vodocementni factor (w/c) ima značajan utjecaj na oblikovanje optimalne mješavine poroznog betona. Vodocementni faktor od 0,34 daje najveću tlačnu čvrstoću nakon 7 i 28 dana.

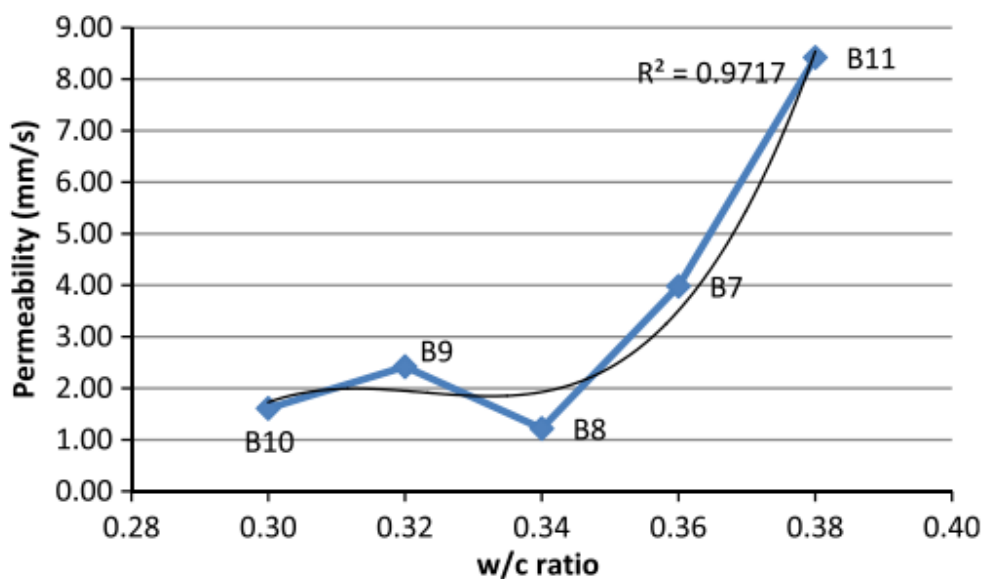
Tablica 3.13 Svojstva poroznog betona za različite vrijednosti w/c [9]

Batch No.	Aggregate size	Water to cement ratio	Sand (%)	SF (%)	SP (%)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	7 days compressive strength (Mpa)	28 day compressive strength (Mpa)	Porosity (%)	Permeability (mm/s)
B10	9.5–4.75	0.30	18	7	0.8	2266	35.2	40.3	8.0	1.61
B9	9.5–4.75	0.32	18	7	0.8	2243	36.8	40.5	6.5	2.42
B8	9.5–4.75	0.34	18	7	0.8	2325	36.8	46.2	3.5	1.22
B7	9.5–4.75	0.36	18	7	0.8	2248	25.8	33.2	7.5	3.98
B11	9.5–4.75	0.38	18	7	0.8	2092	20.3	23.3	16.5	8.42



Slika3.4 Odnos w/c faktora i tlačne čvrstoće [9]

Na slici 3.4 je vidljivo da veza između w/c faktora i tlačne čvrstoće nije linearna, već je možemo podijeliti na dvije faze. Kada je w/c faktor manji od 0,34, tlačna čvrstoća blago raste uz povećanje w/c faktora. Kada je w/c faktor veći od 0,34, tlačna čvrstoća naglo pada.



Slika3.5 Odnos w/c faktora i propusnosti [9]



Propusnost je najmanja (1,22 mm/s) za w/c faktor od 0,34. Na slici 3.5 je vidljivo da se w/c faktor od 0,34 može uzeti kao granična vrijednost, nakon koje propusnost poroznog betona raste. Istraživanjem je definirano da se veća propusnost može dobiti koristeći w/c faktore u rasponu od 0,34 do 0,38, ali je tada tlačna čvrstoća najmanja. Nasuprot tome, velika vlačna čvrstoća se dobije za w/c faktor u rasponu od 0,30-0,34. Tada je sadržaj vode prenizak za hidrataciju cementa. Ne preporuča se w/c faktor manji od 0,30. Prihvatljiva poroznost iznosi u granicama od 2-5,4 mm/s sa w/c faktorom od 0,32 čime se postže dovoljna tlačna čvrstoća i propusnost.



Slika 3.6 Usporedba uzoraka poroznog betona bez dodataka i sa dodacima [9]

### 3.2.6 Zaključak

U ovom radu su prikazani rezultati eksperimentalnog istraživanja te utjecaj različitih čimbenika na čvrstoću i propusnost poroznog betona.

Ispitivane su tri vrste agregata: kvarcit, dolomit i vapnenac. Dolomit se pokazao kao najbolji agregat za izradu poroznog betona. Razlog tome je što, u odnosu na kvarcit i dolomit, ima najveću otpornost na habanje i najveću tlačnu čvrstoću.

Korištenje silikatne prašine nije bilo dovoljno učinkovito za poboljšanje tlačne čvrstoće poroznog betona. Međutim, zajedničko djelovanje superplastifikatora i silikatne prašine pokazalo se dobrom kombinacijom za mješavinu poroznog betona.

Upotreba drobljenog pijeska povećava tlačnu čvrstoću poroznog betona i ima veću učinkovitost od uporabe kontinuirane frakcije agregata (9,5-2,36 mm).

Sadržaj vode je jedan od bitnih čimbenika koji utječe na tlačnu čvrstoću poroznog betona. Za optimalni w/c faktor se uzima 0,32 koji, nakon 28 dana, rezultira čvrstoću od 40 MPa i vodopropusnost od 2 mm/s.

### **3.3 Utjecaj agregata na statički modul elastičnosti poroznog betona napravljenog od portland cementa (J. Pitt, L. K. Crouch, R. Hewitt)**

#### **3.3.1 Uvod**

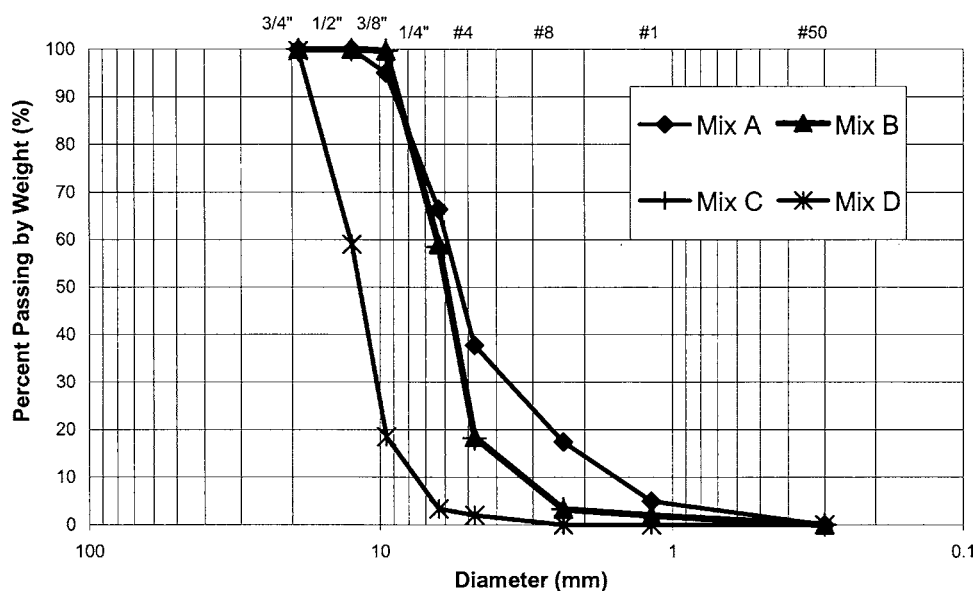
Porozni beton je mješavina Portland cementa, vode, krupnog agregata, i u nekim slučajevima, kemijskih dodataka. Isključivanjem finijeg agregata iz mješavine smanjuje se obradivost poroznog betona, te se mora primjeniti snaga zbijanja da bi se dobila željena svojstva.

Nedostatak sitnog agregata stvara šupljikavu strukturu. Sadržaj pora ima bitnu ulogu u svojstvima očvrsllog poroznog betona te utječe na čvrstoću i poroznost. Što je veći sadržaj pora veća je propusnost, a manja tlačna čvrstoća. Bitno je postići optimalni sadržaj pora kako bi se postigla optimalna čvrstoća i propusnost. Obično se taj sadržaj kreće u rasponu od 15-35%. Željeni sadržaj šupljina može se postići izmjenom razine zbijanja ili podešavanjem omjera i svojstava agregata. Kada je razina zbijanja minimalna povećava se sadržaj šupljina. Pošto nema točno definirane razine zbijanja teško je postići da porozni beton ima željenu razinu pora. Volumen šupljina je najveći kada su čestice agregata jednakih veličina. Prethodnim istraživanjima je dokazano da je bolje mijenjati svojstva agregata (gradacija, veličina i količina), umjesto da se mijenja razina zbijanja. Definirano je da sadržaj pora i propusnost u velikoj mjeri ovise o agregatu. Također, tlačna čvrstoća ovisi o veličini agregata a sadržaj šupljina o gradaciji.

Tlačna čvrstoća i statički modul elastičnosti su bitna svojstva za izradu poroznog betona. Dosadašnja istraživanja su definirala učinak agregata na tlačnu čvrstoću, dok točan odnos agregata i modula elastičnosti nije definiran.

### 3.3.2 Materijali

U ovom istraživanju definirane su tri različite mješavine, te jedna standardna mješavina. Kao agregat je korišten vapnenac koji je prosijavan i kombiniran kako bi se dobila željena gradacija za svaku mješavinu (slika 3.7). Sve mješavine imaju isti vodocementni faktor koji iznosi 0,39 te je za svaku mješavinu unaprijed definirani sadržaj šupljina koji iznosi 20%.



Slika 3.7 Granulometrijski sastav agregata [2]

Tablica 3.13 Omjeri smjesa [9]

Component	Mix A		Mix B		Mix C		Mix D	
	kg/m <sup>3</sup>	(lb/yd <sup>3</sup> )	kg/m <sup>3</sup>	(lb/yd <sup>3</sup> )	kg/m <sup>3</sup>	(lb/yd <sup>3</sup> )	kg/m <sup>3</sup>	(lb/yd <sup>3</sup> )
Type I portland cement	266.97	450	266.97	450	222.48	375	222.48	375
Class C fly ash	77.72	131	77.72	131	64.67	109	64.67	109
Water (net)	105.01	177	105.01	177	87.21	147	87.21	147
Aggregate (SSD)	1,541.93	2,599	1,541.93	2,599	1,620.24	2,731	1,620.24	2,731

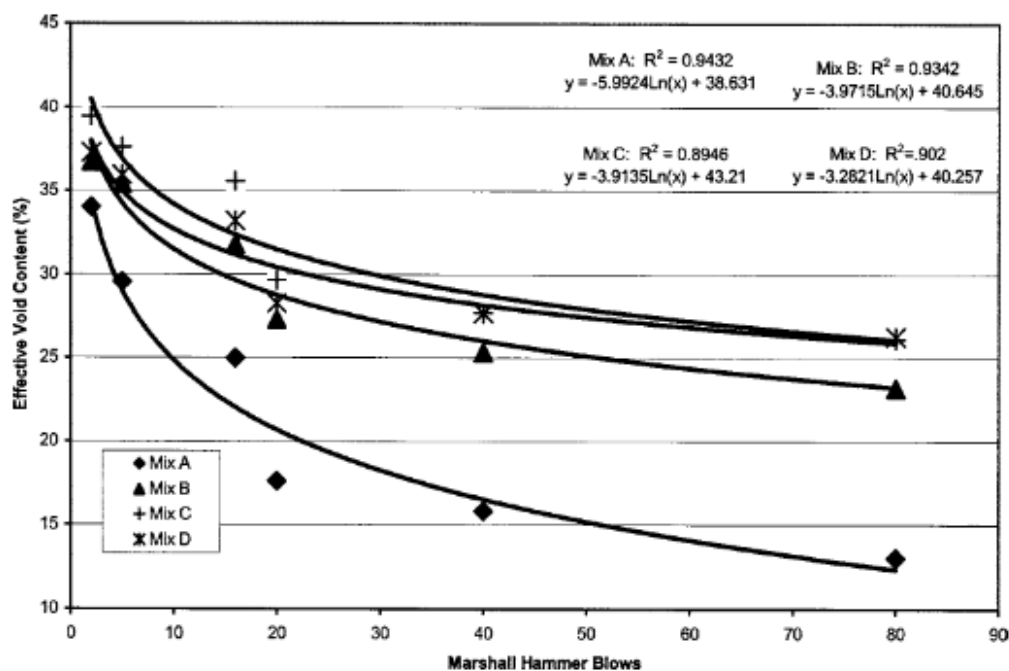
Tablica 3.14 Prikaz dodatka [2]

Admixture	Mix A		Mix B		Mix C		Mix D	
	mL/100 kg	(oz/cwt)	mL/100 kg	(oz/cwt)	mL/100 kg	(oz/cwt)	mL/100 kg	(oz/cwt)
Type F	326.0	5	326.0	5	0	0	0	0
Viscosity modifier	130.4	2	130.4	2	652	10	652	10
Type D	0.0	0	0.0	0	326	5	326	5

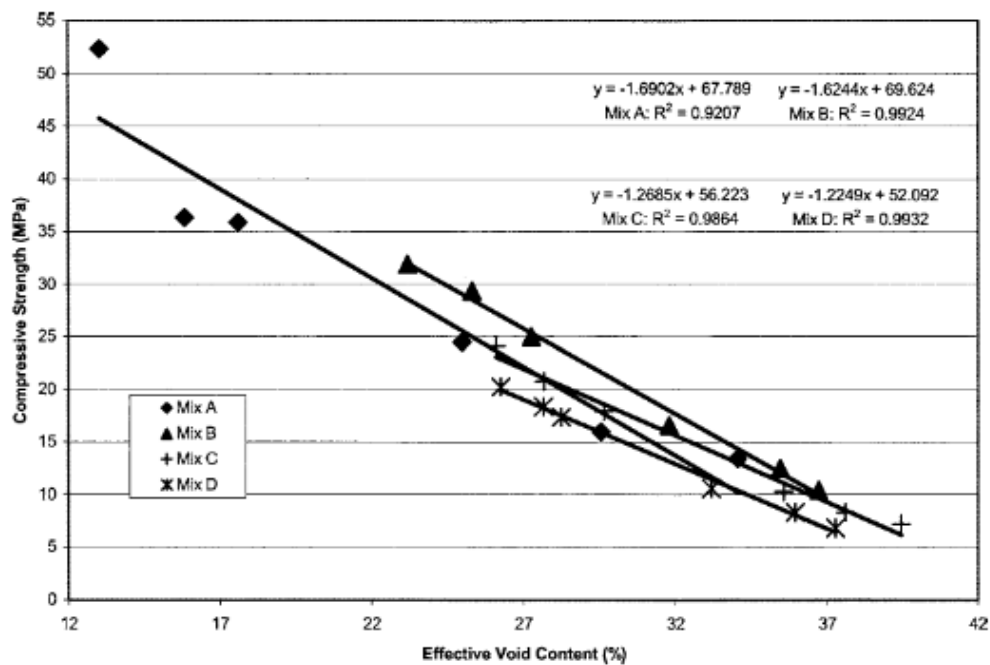
Kako bi se postigla željena obradivost, vršilo se zbijanje pomoću Marshall Hammer metode. Zbijanje se vršilo u 6 razina.

### 3.3.3 Rezultati

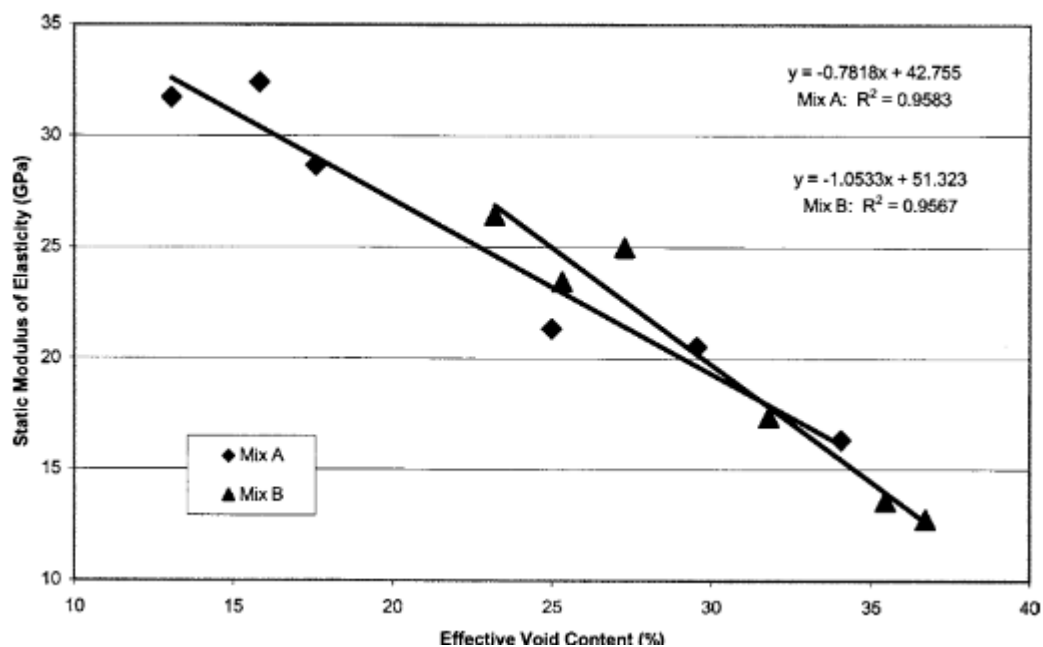
Dobiveni rezultati ispitivanja prikazani su na slikama 3.8 - 3.12.



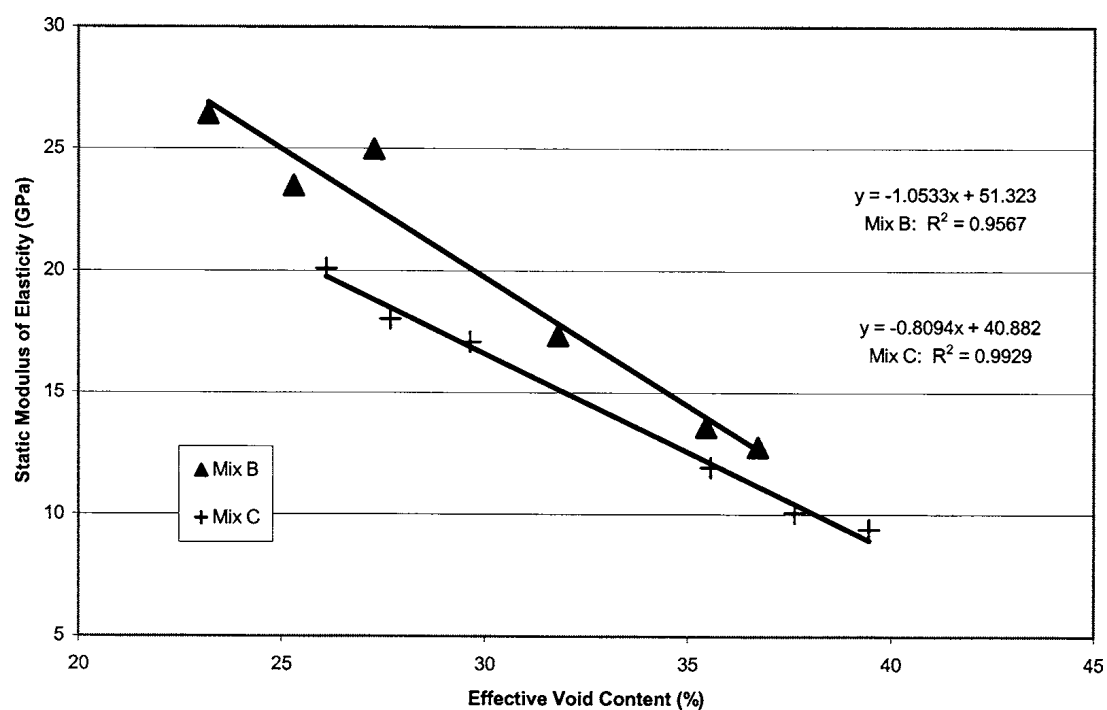
Slika 3.8 Sadržaj pora u odnosu na snagu zbijanja [2]



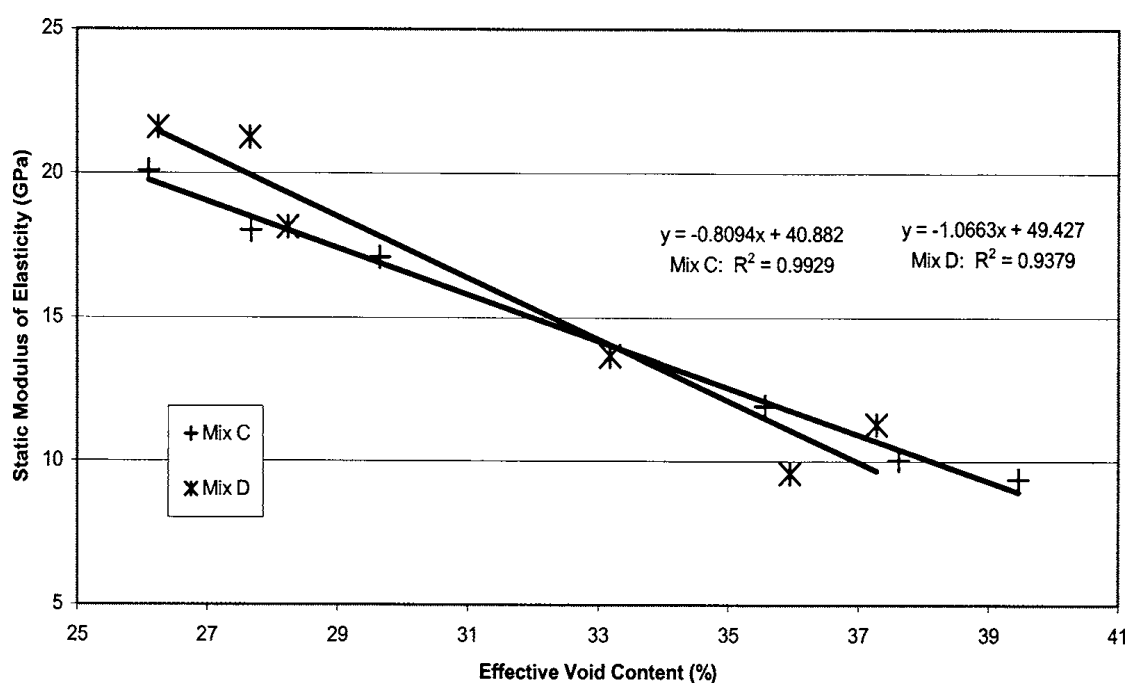
Slika 3.9 Tlačna čvrstoća u odnosu na sadržaj pora [2]



Slika 3.10 Statički modul elastičnosti u odnosu na sadržaj šupljina [2]



Slika 3.11 Statički modul elastičnosti u odnosu na sadržaj šupljina [2]



Slika 3.12 Statički modul elastičnosti u odnosu na sadržaj šupljina [2]

### 3.3.3.1 Utjecaj granulometrijskog sastava agregata

U ovom ispitivanju je definirano da je bolja mješavina poroznog betona koja ima jednoliku gradaciju sa manjim rasponom agregatnih veličina. U ovom ispitivanju mješavina B ima veći sadržaj šupljina od mješavine A, za svaku razinu zbijenosti (slika 3.8). Kako je kod krivulje sa manjim brojem razreda agregata manja volumna koncentracija agregata, to rezultira većim sadržajem šupljina. Mješavina B pokazuje veću tlačnu čvrstoću od mješavine A (slika 3.9), iako obje mješavine imaju jednoliku gradaciju i sadržaj pora.

Statički modul elastičnosti je veći za mješavinu B kada je sadržaj praznina u rasponu od 23-31%. Za mješavinu B je potrebna veća snaga zbijanja da bi se postigao isti sadržaj šupljina kao za mix A, što je i prikazano na slici 3.8. Kod veće snage zbijanja, veza između paste i agregat postaje jača, čime se postiže povećanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti.

### 3.3.3.2 Utjecaj količine agregata

Razlika između mješavine B i mješavine C je u u količini agregata koja je s 58,7% porasla na 61,7% ukupnog volumena. Povećanjem količine agregata u mješavini C smanjuje se količina cementa, letećeg pepela i vode. Za jednaki sadržaj šupljina, mješavina C pokazuje nižu tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti od mješavine B (slika 3.9 i 3.11). Ovi rezultati su u skladu s uobičajnim rezultatima za porozni beton koji pokazuju da se s povećanjem tlačne čvrstoće povećava modul elastičnosti. Sadržaj šupljina u mješavini se povećava s povećanjem ukupne količine agregata, što se može objasniti djelovanjem paste na porozni beton. Dovoljna količina paste je potrebna za prekriti agregat i osigurati povezivanje, dok višak paste ispuni šupljine. Zato se kod poroznog betona dodaje manja količina paste da bi se dobio veći sadržaj šupljina. Smanjenjem količine paste se smanjuje modul elastičnosti i tlačna čvrstoća poroznog betona.

### 3.3.3.3 Utjecaj veličine agregata

Mješavine B i C imaju isti sadržaj agregata što je i vidljivo na slici 3.7. Veličina zrna za mješavinu D se kreću od 4,75-19,5 mm, dok se za mješavinu C kreću u rasponu 0,30-9,5mm. Iako je sadržaj šupljina za mješavinu C i D relativno sličan, stvarni sadržaj šupljina je veći kod mješavine D. Kako se smanjuje veličina zrna tako se područje vezivanja povećava i rezultira pojačanjem čvrstoće. Vidljivo da se s povećanjem šupljina u mješavini D modul elastičnosti se smanjuje za sve razine zbijanja. Time je definirano da se s povećanjem šupljina smanjuje modul elastičnosti za sve razine zbijanja.

### **3.3.4 Zaključak**

U ovom istraživanju zaključeno je da se korištenjem jednolike gradacije dobiva nešto veći sadržaj šupljina za jednaku snagu zbijanja. Kontinuirana krivulja čini mješavinu pouzdanijom. Također, tlačna čvrstoća i modul elastičnosti su veći kada optimalni sadržaj pora u mješavini poroznog betona iznosi 23-31%. Koristeći veliku snagu zbijanja smanjuje se sadržaj šupljina a povećava čvrstoća poroznog betona.

Povećanje količine agregata rezultira velikim sadržajem šupljina, za istu snagu zbijanja, pri čemu dolazi do smanjenja tlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Dodavanjem veće količine agregata dovodi do smanjenja količine paste, a što je manja količina paste manji je modul elastičnosti i tlačna čvrstoća.



### **3.4 Utjecaj veličine agregata i vezivne tvari na svojstva poroznog betona**

**(Tun Chi Fu, W. Yeih, Jiang Jhy Chang, R. Huang)**

#### **3.4.1 Uvod**

Porozni beton je materijal koji se sastoji od minimalne količine sitnog agregata i ograničene količine cementne paste. Porozni beton, zbog svojih svojstava, smanjuje učinak “toplinskog otoka” u urbanim područjima. Također, porozni beton se smatra učinkovitim u borbi protiv poplava zbog svoje izvrsne vodopropusnosti. Upotreba poroznog betona je ograničena. Razlog tome je što čvrstoća poroznog betona ne zadovoljava minimalne zahtjeve za konstrukcijski beton (21 MPa nakon 28 dana). Zato se takav beton koristi na mjestima gdje čvrstoća i nije toliko bitna, kao što su pješački nogostupi, biciklistička staza, itd ...

Različite strategije se mogu koristiti za poboljšanje čvrstoće poroznog betona uz postizanje potrebne propusnosti :

- Poboljšanje svojstava veziva smanjenjem w/c faktora i dodavanjem silikatne prašine
- Korištenje različitih vezivnih tvari u zamjenu za cementnu pastu
- Povećanjem temperature u fazi sušenja

Definirano je da mješavina poroznog betona s jednom veličinom agregata osigurava bitno poboljšanje apsorpcije zvuka u usporedbi s klasičnim betonom. U prethodnim istraživanjima proučavao se utjecaj veličine zrna agregata na statički modul elastičnosti. Zaključeno je da s povećanjem količine agregata dolazi do smanjenja tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti. Razlog tome je što s povećanjem količine agregata dolazi do smanjenja količine paste. Od poroznog betona se očekuje, osim izvrsne vodopropusnosti, da pokaže dobre mehaničke karakteristike.

U ovoj studiji, uzorci poroznog betona su napravljeni podešavanjem parametara: veličine i vrste agregata, w/c faktora i količine veziva.

### 3.4.2 Eksperimentalni dio

Eksperiment uključuje dvije faze. U prvoj fazi se kao vezivo koristila cementna pasta koja se dobije miješanjem cementa i vode. Pri tome se uzimaju u obzir tri ključna parametra: veličina agregata, postotak šupljina i w/c faktor. Druga faza je usmjerena na dodavanje silikatne prašine i alkalno-aktivne zgre, tj. korišten je cement u kombinaciji s pucolanskim materijalom i šljakom umjesto čistog cementnog tijesta.

Prilikom odabira w/c faktora treba uzeti u obzir obradivost, vodopropusnost i mehaničku čvrstoću. Također, cementnoj pasti sa niskim w/c faktorom od 0,25 dodan je superplastifikator za povećanje obradivosti veziva. Korišten je Portland cement tipa I i krupni agregat u četiri različite veličine. Svojstva agregata su prikazana u tablici 3.16.

Tablica 3.15 Prikaz varijabli u prvoj i drugoj fazi eksperimenta [4]

(a)				
Experimental variables of Stage 1				
Aggregate code and size	A 0.32 cm	B 0.48 cm	C 0.64 cm	D 0.95 cm
Binder	Cement paste			
w/c ratio		0.25 0.35 0.452		
Total volume percent of filled voids	50%	60%	70%	80%
Aggregate code and size	B (0.48 cm)			
(b)				
Experimental variables of Stage 2				
Binder	Alkali-activated slag paste			Silica-fume cement paste
Total volume percent of filled voids	80%			
L/Sg or w/c ratio	0.35	0.4	0.45	0.35
Substitution ratio	—			10% 20% 30%

Tablica 3.16 Svojstva krupnog agregata [4]

Code	A	B	C	D
Nominal size	1/8 in.	3/16 in.	1/4 in.	3/8 in.
Maximum size	0.48 cm	0.64 cm	0.95 cm	1.27 cm
Range of particle sizes	0.24–0.48 cm	0.48–0.64 cm	0.64–0.95 cm	0.95–1.27 cm
Specific gravity	2.65	2.69	2.66	2.72
Void volume per unit volume	37.3%	37.5%	36.8%	38.3%

Tablica 3.17 Omjeri mješavina [4]

Aggregate	w/c ratio	Percent of voids filled	Amount of aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Amount of cement (kg/m <sup>3</sup> )	Amount of mixing water (kg/m <sup>3</sup> )	Amount of plasticizer (kg/m <sup>3</sup> )
A	0,25	50	1665	328	66	17
		60	1665	394	79	20
		70	1665	460	92	23
		80	1665	525	105	26
	0,35	50	1665	279	96	-
		60	1665	335	115	-
		70	1665	392	134	-
		80	1665	447	154	-
	0,45	50	1665	243	109	-
		60	1665	291	131	-
		70	1665	340	153	-
		80	1665	389	175	-
B	0,25	50	1684	330	66	17
		60	1684	396	79	20
		70	1684	462	92	23
		80	1684	568	106	26
	0,35	50	1684	281	98	-
		60	1684	337	118	-
		70	1684	393	138	-
		80	1684	449	157	-
	0,45	50	1684	244	110	-
		60	1684	293	132	-
		70	1684	342	154	-
		80	1684	391	176	-
C	0,25	50	1683	324	65	16
		60	1683	389	78	19
		70	1683	454	91	23
		80	1683	518	104	26
	0,35	50	1683	276	96	-
		60	1683	331	116	-
		70	1683	386	135	-
		80	1683	441	154	-
	0,45	50	1683	240	108	-
		60	1683	288	129	-
		70	1683	336	151	-
		80	1683	384	173	-
D	0,25	50	1682	337	67	17
		60	1682	404	81	20
		70	1682	471	94	24
		80	1682	530	108	27
	0,35	50	1682	286	100	-
		60	1682	343	120	-
		70	1682	400	140	-
		80	1682	458	160	-
	0,45	50	1682	249	112	-
		60	1682	299	134	-
		70	1682	349	157	-
		80	1682	398	179	-

Tablica 3.18 Udio alkalno-aktivne zgre u mješavini [4]

L/Sg	0.35	0.40	0.45
Aggregate size		B	
Volume percent of filled voids		80%	
Concentration of alkali activator	SiO <sub>2</sub> = 106 g/L		Na <sub>2</sub> O = 105 g/L
Amount of phosphoric acid		0.74 M	
Amount of slag (kg/m <sup>3</sup> )	432	403	377
Amount of alkali-activated solution (kg/m <sup>3</sup> )	151	161	170
Amount of aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	1684	1684	1684

Tablica 3.19 Udio silikatne prašine u mješavini [4]

Proportion of cement replaced by silica fume	10%	20%	30%
Aggregate size		B	
Volume percent of filled voids		80%	
Amount of cement (kg/m <sup>3</sup> )	404	359	314
Amount of silica fume (kg/m <sup>3</sup> )	39	78	118
Amount of mixing water (kg/m <sup>3</sup> )	155	153	151
Amount of aggregate (kg/m <sup>3</sup> )		1684	

### 3.4.3 Testovi

#### 3.4.3.1 Porozitet

Prvo se izračuna volume uzorka  $V_1$ . Nakon toga, uzorak je stavljen u vodu te mu je izmjerena težina  $W_1$ . Nakon što je uzorak ispunjen vodom, vadi se vani i suši do stalne težine  $W_2$ . Porozitet je definirana matematičkim izrazom:

$$P_1 = \left[ 1 - \frac{(W_2 - W_1)}{V_1} \right] * 100\%.$$

#### 3.4.3.2 Jedinična težina

Nakon što se uzorak očvrsne, izvadi se iz kalupa i osuši na 105 °C do stalne težine. Uzorak se izvaže i izračuna njegov volume. Dijeljenjem težine i volumena dobije se težina betona po jedinici volumena.

#### 3.4.3.3 Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća se određuje na cilindričnim betonskim uzorcima na temelju ASTM C39.

#### 3.4.3.4 Vlačna čvrstoća savijanjem

Određuje se na temelju ispitivanja u tri točke.

#### 3.4.3.5 Vlačna čvrstoća cijepanjem

Ispitivanje se vrši na cilindričnom betonskom uzorku.

### 3.4.3.6 Koeficijent vodopropusnosti

Koeficijent vodopropusnosti je definiran matematičkim izrazom :

$$K = \frac{QL}{AH\Delta t},$$

gdje je :

K- koeficijent vodopropusnosti [cm/s],

Q- volumen protoka [mL],

L- debljina uzorka [cm],

H- visina stupca vode [cm],

A- Površina uzorka [cm<sup>2</sup>],

$\Delta t = t_1 - t_0$  – vrijeme trajanja mjerenja [s] .

### 3.4.3.7 Ispitivanje uzoraka u magnezijevom sulfatu

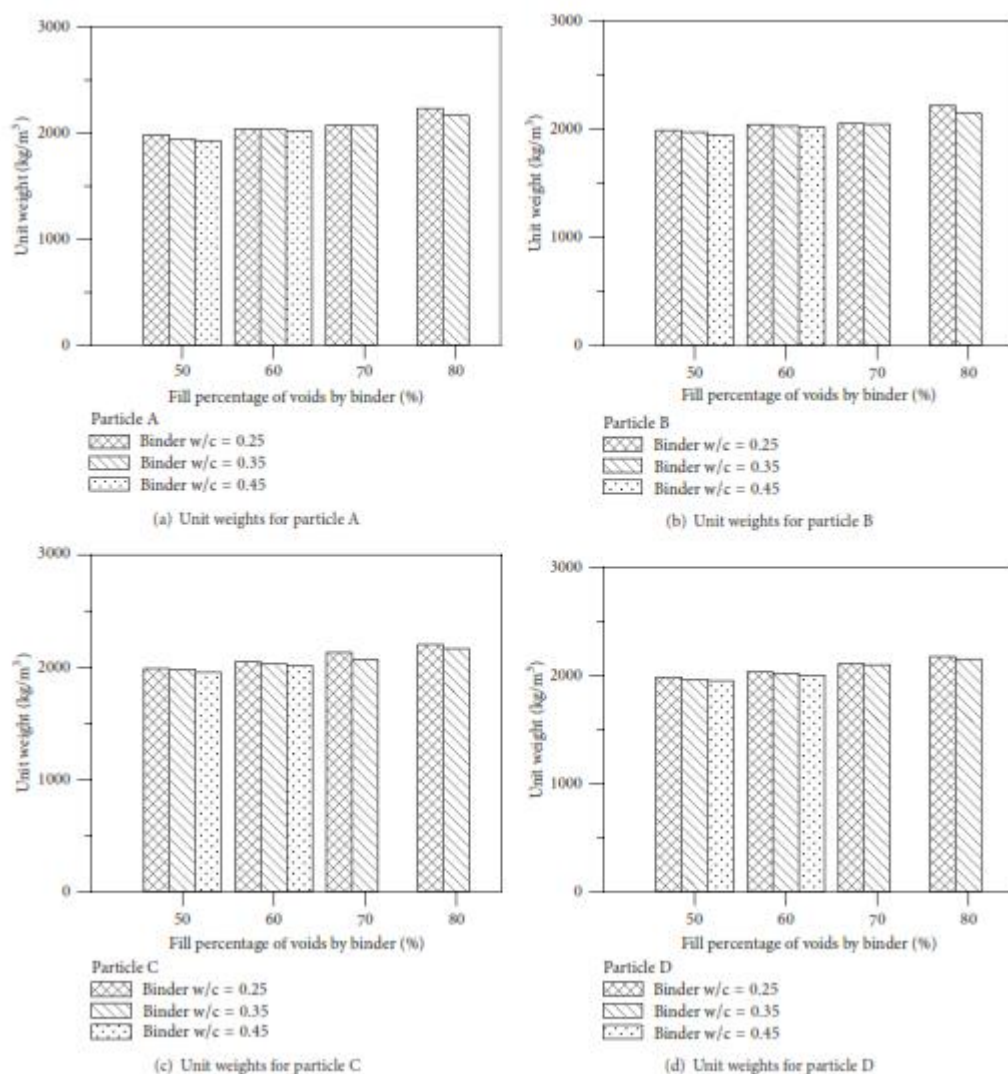
Kod ispitivanja otpornosti agregata koristi se magnezijev sulfat. Prvo se uzorci stave u pećnicu na 110 °C da se osuše do stalne težine  $w_1$ . Nakon hlađenja na sobnoj temperature, uzorak je uronjen u otopinu magnezijevog sulfata u trajanju oko 16-18 h. Nakon toga se vadi iz otopine, opere čistom vodom i osuši do konstantne mase  $w_2$ . Gubitak težine je definiran matematičkim izrazom :

$$\text{Weight loss\%} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\%.$$

## 3.4.4 Rezultati testa i analiza

### 3.4.4.1 Jedinična težina

Budući da porozni beton ima brojne šupljine, njegova težina je nešto manja od klasičnog betona. Jedinična težina se povećava s količinom veziva, ali smanjuje s povećanjem w/c faktora. Uspoređujući utjecaj različitih veziva na jediničnu masu, pasta s alkalno-aktivnom šljakom ima veću masu od kontrolnog uzorka s čistim cementnim tijestom. Pasta s dodatkom silikatne prašine ima manju jediničnu težinu od kontrolnog uzorka. Iz tog je zaključeno da se jedinična težina uzorka smanjuje kako se povećava količina silikatne prašine.



Slika 3.13 Jedinične težine uzoraka koji sadrže različite veličine zrna [4]

### 3.4.4.2 Test propusnosti

Za različite veličine agregata, koeficijent vodopropusnosti se smanjuje kako w/c faktor raste. Što je w/c faktor manji, veziva su vrlo viskozna, što u potpunosti omogućava prekrivanje agregata. Nasuprot tome, veziva s velikim w/c faktor imaju veliku fluidnost, te višak veziva blokira put čime se smanjuje propusnost vode. Tablica 3.20 je vidljivo da postoje uzorci poroznog betona bez koeficijenta propusnosti. Kod njih se javlja fenomen propadanja. Kod tog fenomena, cementna pasta se ne zalijepi za agregat i propada do dna zbog gravitacije. Iz tog razloga pasta nije ravnomjerno raspoređena oko agregata i prikuplja se u donjem dijelu uzorka. Na temelju toga, te uzorke s w/c faktorom od 0,25 odbacujemo. Također, iz tablice je vidljivo da

mješavina 25D50C napravljena od agregata D i čiste cementne paste C, s w/c faktorom od 0,25 i 50 % udjelom šupljina ima najbolji koeficijent vodopropusnosti  $K = 0,1440$ . A mješavina 35A80C ima najmanji.

Tablica 3.20 Koeficijent vodopropusnosti za različite mješavine [4]

Label	$K$ (cm/sec)	Label	$K$ (cm/sec)	Label	$K$ (cm/sec)	Label	$K$ (cm/sec)
25A50C	0.1140	35A50C	0.0997	45A50C	0.0881	35B80A	0.0430
25A60C	0.1052	35A60C	0.0555	45A60C	0.0464	40B80A	0.0446
25A70C	0.0852	35A70C	0.0323	45A70C	NA	45B80A	0.0421
25A80C	0.0436	35A80C	0.0304	45A80C	NA	35B80S1	0.0454
25B50C	0.1259	35B50C	0.1192	45B50C	0.1176	35B80S2	0.0441
25B60C	0.1163	35B60C	0.1044	45B60C	0.0925	35B80S3	0.0444
25B70C	0.0864	35B70C	0.0585	45B70C	NA		
25B80C	0.0857	35B80C	0.0439	45B80C	NA		
25C50C	0.1423	35C50C	0.1273	45C50C	0.1210		
25C60C	0.1283	35C60C	0.1199	45C60C	0.1097		
25C70C	0.1185	35C70C	0.1118	45C70C	NA		
25C80C	0.1126	35C80C	0.1046	45C80C	NA		
25D50C	0.1440	35D50C	0.1355	45D50C	0.1331		
25D60C	0.1350	35D60C	0.1292	45D60C	0.1283		
25D70C	0.1284	35D70C	0.1131	45D70C	NA		
25D80C	0.1149	35D80C	0.1105	45D80C	NA		

### 3.4.4.3 Test poroznosti

Unutarnja struktura poroznog betona nije baš kompaktibilna jer nedovoljna količina veziva stvara šupljine. Kao što je i prikazano na slici 3.15. poroznost se smanjuje kako količina veziva raste, a raste kako se povećava veličina zrna agregata.

### 3.4.4.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tablica 3.21 pokazuje rezultate tlačne čvrstoće uzoraka nakon 28 dana. Pasta od alkalno-aktivne šljake (35B80A) ima najveću tlačnu čvrstoću, a cementna pasta (45D50C) ima najmanju čvrstoću. Tlačna čvrstoća se smanjuje kako se ukupna veličina zrna povećava.

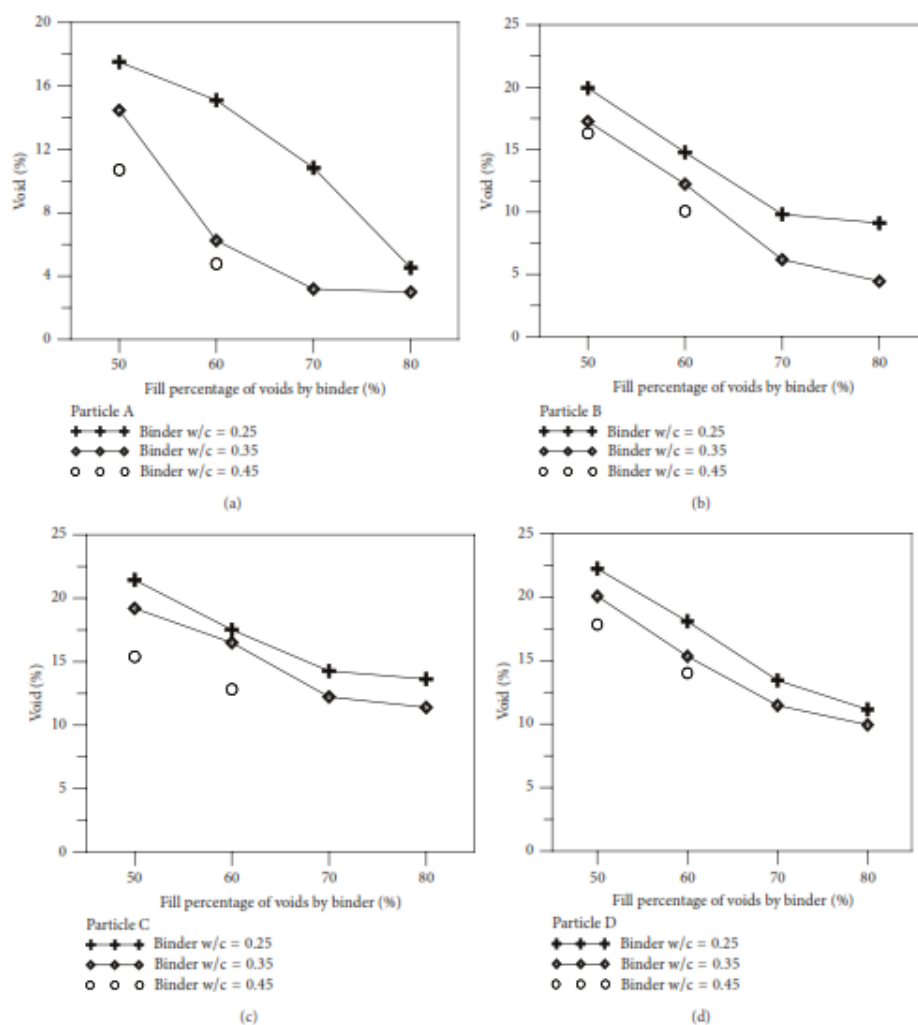
### 3.4.4.5 Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Slika 3.16 prikazuje rezultate vlačne čvrstoće cijepanjem. Pasta s alkalno-aktivnom šljakom (35B80A) ima najveću vlačnu čvrstoću, dok cementna pasta (45D50C) ima najmanju vlačnu čvrstoću. Na slici 3.16 je vidljivo da vezivo s w/c faktorom 0,25 ima najveću vlačnu čvrstoću, a vezivo s w/c faktorom 0,45 ima najmanju vlačnu čvrstoću. Iz toga je vidljivo da w/c faktor znatno utječe na vlačnu čvrstoću poroznog betona. Također, korištenje veće količine

veziva utječe na vlačnu čvrstoću. Uzorak s 80% šupljina ispunjenim vezivom ima najveću tlačnu čvrstoću, dok s povećanjem veličine agregata čvrstoća se smanjuje.

### 3.4.4.6 Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem

Slika 3.17 prikazuje rezultate savojne čvrstoće. Vidljivo je da uzorak 35B80C daje najbolju savojnu čvrstoću od 4,76 MPa, a uzorak 45D50C najmanju. Iz ovoga je vidljivo da je vlačna čvrstoća savijanjem proporcionalna količini veziva koji se koristi. Čvrstoća veziva s manjim w/c faktorom je veća od čvrstoće veziva s većim w/c faktorom. Dakle mješavina s w/c faktorom 0,25 i 80% šupljina ispunjenim vezivom ima najveću savojnu čvrstoću, a vezivo s w/c faktorom 0,45 i 50% šupljina ispunjenim vezivom ima njezanju savojnu čvrstoću. Savojna čvrstoća se smanjuje kako se povećava veličina agregata.

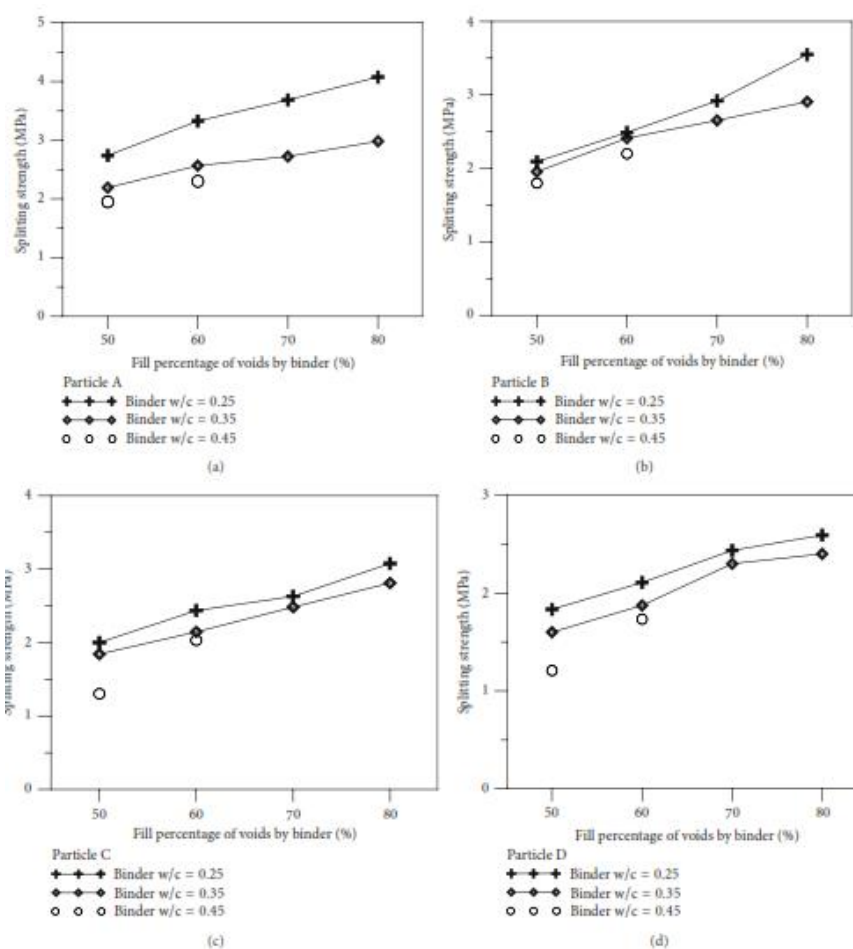


Slika 3.14 Poroznost uzorka različitih veličina agregata [4]

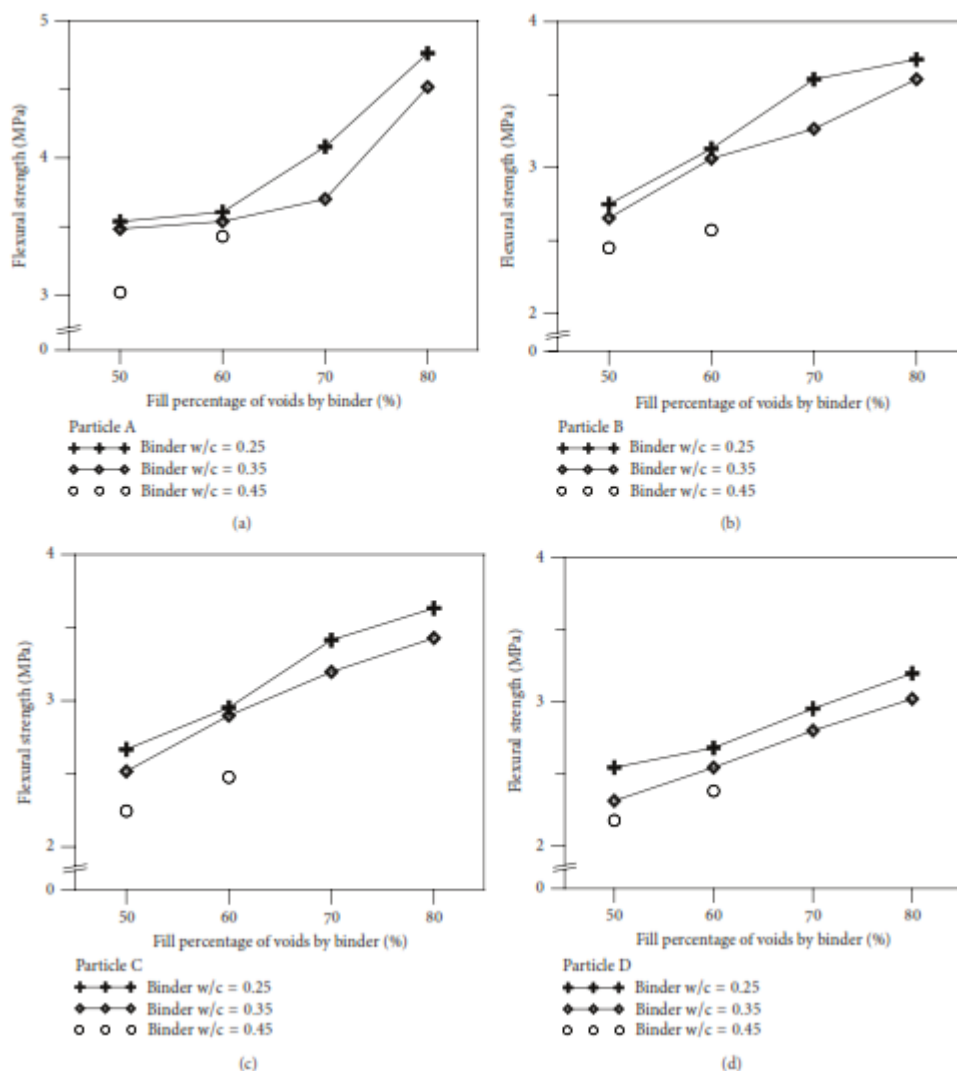


Tablica 3.21 Rezultati tlačne čvrstoće [4]

Label	Compressive strength (MPa)	Label	Compressive strength (MPa)	Label	Compressive strength (MPa)	Label	Compressive strength (MPa)
25A50C	17.49	35A50C	12.30	45A50C	10.62	35B80A	28.73
25A60C	19.01	35A60C	16.01	45A60C	14.83	40B80A	24.98
25A70C	22.61	35A70C	20.95	45A70C	—	45B80A	17.49
25A80C	25.67	35A80C	24.94	45A80C	—	35B80S1	21.98
25B50C	17.07	35B50C	11.87	45B50C	8.74	35B80S2	15.43
25B60C	17.45	35B60C	14.49	45B60C	11.62	35B80S3	7.68
25B70C	20.36	35B70C	18.81	45B70C	—		
25B80C	21.95	35B80C	20.86	45B80C	—		
25C50C	16.26	35C50C	11.24	45C50C	7.49		
25C60C	16.86	35C60C	13.18	45C60C	9.49		
25C70C	20.01	35C70C	15.51	45C70C	—		
25C80C	21.38	35C80C	16.49	45C80C	—		
25D50C	13.45	35D50C	10.34	45D50C	5.62		
25D60C	13.68	35D60C	11.87	45D60C	7.93		
25D70C	17.32	35D70C	14.86	45D70C	—		
25D80C	19.20	35D80C	15.61	45D80C	—		



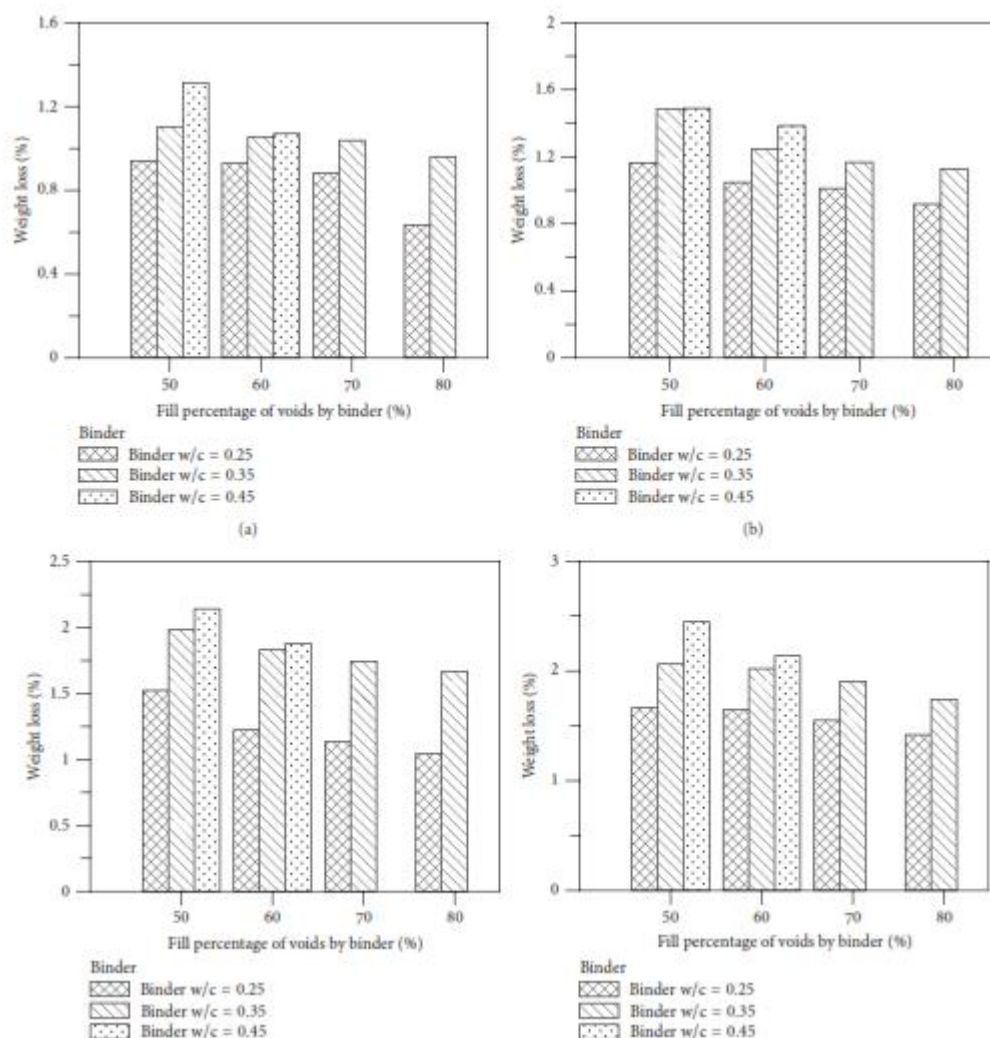
Slika 3.15 Rezultati vlačne čvrstoće cijepanjem za različite veličine agregata [4]



Slika 3.16 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za različite veličine agregata [4]

#### 3.4.4.7 Ispitivanje uzoraka u magnezijevom sulfatu

U ovom istraživanju, uzorci stari 12 dana su uronjeni u zasićeni magnezijev sulfat. Nakon toga, uzorci se isperu i izmjeri im se gubitak mase u postocima. Rezultati su prikazani na slici 3.17. Uzorak 35A80S3, koji se sastoji od cementne paste i 30% silikatne prašine, pokazao je veliki gubitak mase od 3%. Uzorak s vezivom od alkalno-aktivne zgure 35B80A dao je minimalni gubitak. Gubitak mase raste kako raste količina veziva. Najmanji za w/c faktor 0,25 i povećava se s porastom w/c faktora. Razlog tome je što, koristeći malu količinu veziva, raste broj šupljina, i time uzorak postaje dostupan za djelovanje sulfata.

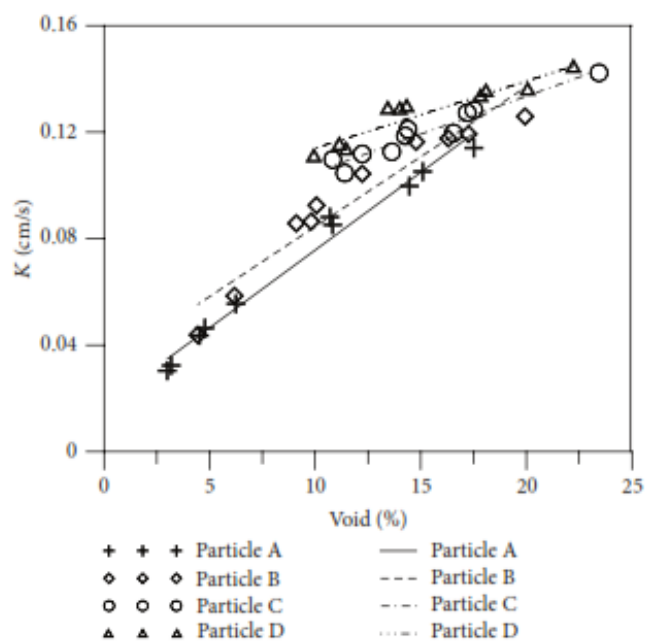


Slika 3.17 Postotak gubitka mase uzoraka sa različitom veličinom agregata [4]

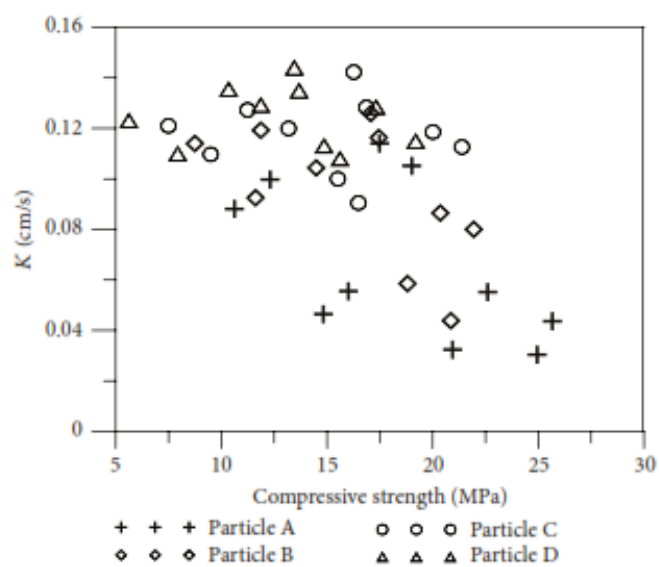
#### 3.4.4.8 Usporedba koeficijenta vodopropusnosti sa poroznosti i tlačnom čvrstoćom

Uzorci sa 4 različite vrste agregata su podvrgnuti ispitivanju propusnosti i poroznosti. Rezultati su prikazani na slici 3.18. Propusnost vode je proporcionalna s poroznosti. Također, definirano je što je veća količina agregata da je veća i propusnost.

Slika 3.19 pokazuje da se smanjuje tlačna čvrstoća kako se povećava koeficijent vodopropusnosti.



Šlika 3.18 Prikaz odnosa porozosti i koeficijenta vodopropusnosti [4]



Slika 3.19 Prikaz odnosa tlačne čvrstoće i koeficijenta vodopropusnosti [4]

### 3.4.5 Zaključak

Koeficijent vodopropusnosti i poroznosti se smanjuje s povećanjem količine veziva, a povećava se s povećanjem veličine agregata.

Porozni beton koji sadrži vezivo s niskim w/c faktorom je vrlo viskozan, što omogućava prekrivanje agregata i bolju vodopropusnost.

Mehanička čvrstoća se smanjuje s povećanjem vodopropusnosti. Međutim, znatna količina veziva može poboljšati čvrstoću, ali smanjuje propusnost.

Pasta od alkalno-aktivne zgure sa omjerom L/Sg (težinski omjer između tekuće faze aktivatora i zgure) koji iznosi 0,35 i 0,40 ima veću mehaničku čvrstoću od klasičnog cementnog tijesta. Prema tome, upotreba odgovarajuće količine alkalno-aktivne šljake može učinkovito poboljšati mehaničku čvrstoću poroznog betona.

Uzorci poroznog betona sa vezivom koji sadrži 10% silikatne prašine maju bolju mehaničku čvrstoću od kontrolnih uzoraka s čistim cementnim tijestom. Ovaj rezultat nije bio uočen za uzorke sa vezivom koji sadrže 20% i 30% silikatne prašine. Dakle, dodavajući pogodnu količinu veziva može se poboljšati mehanička čvrstoća poroznog betona.

Gubitak mase u poroznom betonu se povećava kako se w/c faktor povećava. Također, postotak mršavljenja je proporcionalan veličini agregata. Uzorak koji se sastoji od veziva s alkalno-aktivnom šljakom pokazuje visoku otpornost na djelovanje sulfata, za razliku od uzoraka koji se sastoje od čiste cementne paste.

## 4 EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA SVOJSTAVA POROZNOG BETONA

### 4.1 Uvod u eksperimentalni dio rada

Cilj ovog istraživanja je ispitati svojstva poroznog betona od drobljenog agregata. Svrha rada je izraditi beton koji ima dobru vodopropusnost i poroznost, a ujedno i dovoljno veliku čvrstoću. To će se nastojati postići upotrebom optimalnog sadržaja agregata i ostalih komponenti (vode, cementa i drugih dodataka).

U skladu s time napravljeno je 8 mješavina. Mješavine sadrže jednaku količinu cementa (  $350 \text{ kg/m}^3$  betona), a razlikuju se po udjelu i veličini zrna agregata. Polazni vodocementni faktor je za sve mješavine isti i iznosi 0,35.

Mješavine poroznog betona su sljedeće:

- I-1 – mješavina napavljena od drobljenog agregata, frakcije 4 - 8 mm
- I-2 – mješavina napavljena od drobljenog agregata, frakcije 8 - 11,2 mm
- I-3 – mješavina napavljena od drobljenog agregata, frakcije 11,2 - 16 mm
- I-4 – mješavina napavljena od drobljenog agregata; sadrži 70% frakcije 4 - 8 mm i 30% frakcije 8 - 11,2 mm
- I-5 – mješavina napavljena od drobljenog agregata; sadrži 70% frakcije 4 - 8 mm i 30% frakcije 11,2 - 16 mm
- I-6 – mješavina napavljena od prirodnog agregata, frakcije 4 - 8 mm
- I-7 – mješavina napavljena od mramornog i dekorativnog šljunka , frakcije 7 - 12 mm (85%) i drobljenog agregata, frakcije 2 - 4 mm (15%)
- I-8 – mješavina napavljena od drobljenog agregata, frakcije 4-8 mm s dodatkom letećeg pepela

Cilj ovog rada je ispitati beton u svježem i očvrslom stanju. Nakon što je svježi beton ispitan, ugrađuje se u kalupe oblika kocke dimenzija 150 x 150 x 150 mm i po dva uzorak svake mješavine se ugrađuje u kalup oblika valjka. Mješavine se ugrađuju u kalupe bez utjecaja vibracija, pomoću čeličnih šipki.

Svi uzorci su nakon 24 sata izvađeni iz kalupa i prebačeni u vlažnu komoru, u vodu na temperature  $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , gdje su čuvani do dana ispitivanja.

U svježem stanju se ispituje konzistencija poroznog betona pomoću “metode kuglice”. Manja količina mješavine se zahvaća rukom i oblikuje se kuglica koja se promatra na raširenom dlanu. Ako kuglica zadržava svoj oblik i ne dolazi do odvajanja zrna, mješavina ima zadovoljavajuću konzistenciju.

U očvrslom stanju na uzorcima poroznog betona su izvedena sljedeća ispitivanja

- Ispitivanje poroznosti
- Ispitivanje propusnosti
- Ispitivanje tlačne čvrstoće ( nakon 28 dana )
- Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

## **4.2 Korišteni materijali**

U pripravljanju pokusnih mješavina upotrebljeni su sljedeći materijali:

- Cement CEM II/ A-S 42,5 R
- Agregat
- Voda
- Leteći pepeo

### **4.2.1 Cement**

U pripravi poroznog betona korišten je Portlandski cement s dodatkom zgure CEM II/ A-S 42,5 R [10]. Proizvođač cementa je CEMEX Hrvatska. Mješavine su napravljene s 350 kg cementa za kubni metar betona.

#### Karakteristike cementa:

- Visoka početna i konačna čvrstoća
- Smanjena tendencija skupljanja i nastanka pukotina
- Izvrsna svojstva ugradivosti
- Svjetlija boja prikladnija za kombiniranje s pigmentima
- Umjerena otpornost na agresivne medije

#### Preporuke za primjenu:

- Radovi u cestogradnji i cestovnim građevinama
- Izgradnja poslovnih, stambenih i industrijskih objekata
- Podzemni radovi temeljenja i podloga te stabilizacije tla

- Izrada gotovih elemenata od betona, armiranog i prednapregnutog betona
- Transportni, pumpani beton
- Izrada morta, žbuke i ljepila

Osobito je prikladan:

- Za izradu vodonepropusnih betona kao i onih otpornih na mraz i sol
- Za korištenje u umjereno agresivnim sredinama
- Za betonske konstrukcije većih presjeka

Način transportiranja i skladištenja

- Transportirati u sredstvima koja štite cement od utjecaja vlage
- Transportna sredstva prije punjenja cementom moraju biti očišćena od tvari koje mogu utjecati na kvalitetu cementa
- Skladištiti u betonskim i čeličnim silosima koji štite cement od vanjskih utjecaja, posebice od utjecaja vlage
- Pri skladištenju u silos osigurati da ne dolazi do miješanja cementa s drugim proizvodima
- Uz pravilan transport i skladištenje, cement je potrebno upotrijebiti najkasnije 6 mjeseci nakon isporuke. [14]

Karakteristična svojstva upotrebljenog cementa su prikazana u sljedećoj tablici.

Tablica 4.1 Karakteristična svojstva cementa [10]

Bitna značajka	Svojstvo	Harmonizirana tehnička specifikacija
Oznaka i sastav	CEM II/A-S	EN 197-1:2011
Tlačna čvrstoća (rana i normirana)	42.5 R	
Vrijeme vezivanja	zadovoljava	
Postojanost volumena: - Le Chatelier - udjel SO <sub>3</sub>	zadovoljava zadovoljava	
Udjel klorida	zadovoljava	
Netopljivi ostatak	zadovoljava	
Gubitak žarenjem	zadovoljava	



Tablica 4.2 Tipična svojstva cementa [10]

TIPIČNA SVOJSTVA		ZAHTJEV NORME
Gubitak žarenjem	$3,0 \pm 0,5\%$	$\leq 5,0$
Netopivi ostatak	$0,25 \pm 0,05\%$	$\leq 5,0$
% SO <sub>3</sub>	$3,0 \pm 0,2\%$	$\leq 4,0$
Kloridi	$0,03+0,02\%$	$\leq 0,1$
Vrijeme vezivanja* (početak)	$170 \pm 30$ min	$\geq 60$
Rana čvrstoća (2 dana)	$27 \pm 2$ MPa	$\geq 20$
Normirana čvrstoća (28 dana)	$53 \pm 2$ MPa	$\geq 42,5; \leq 62,5;$
TIPIČAN SASTAV		ZAHTJEV NORME
Klinker (K) + gips (G)	85%	80-94
Zgura	11%	6-20
Ostalo	0-4%	0-5

\*pri temperaturi od 20°C

#### 4.2.2 Agregat

Kod izvedbe poroznog betona izbjegavaju se sitnije frakcije agregata u svrhu postizanja veće poroznosti i vodopropusnosti. Krupniji agregat daje hidrološke prednosti zbog velikih pora i propusnosti. Beton izrađen od krupnijeg agregata ima manje početno skupljanje i pucanje od betona koji je napravljen od sitnijeg agregata. Također, ima manju nosivost zato jer ima manju unutrašnju površinu kontakta između agregata i cementa, te je teško obradiv tijekom ugradnje. [3]

U ovom radu su korištene frakcije agregata: 2 - 4 mm, 4 - 8 mm, 8 - 11,2 mm, 11,2 - 16 mm, prirodni agregat frakcije 4 – 8 mm, te posebne dekorativne granule - mramorni šljunak, frakcije 7 - 12 mm.

Za potrebe diplomskog rada agregat frakcije 8 – 16 mm i 0 - 4 mm se rastavio na dvije frakcije 8 - 11,2 mm i 11,2 - 16 mm, odnosno 0 – 2 mm i 2 – 4 mm. Prosijavanje se vršilo strojno.

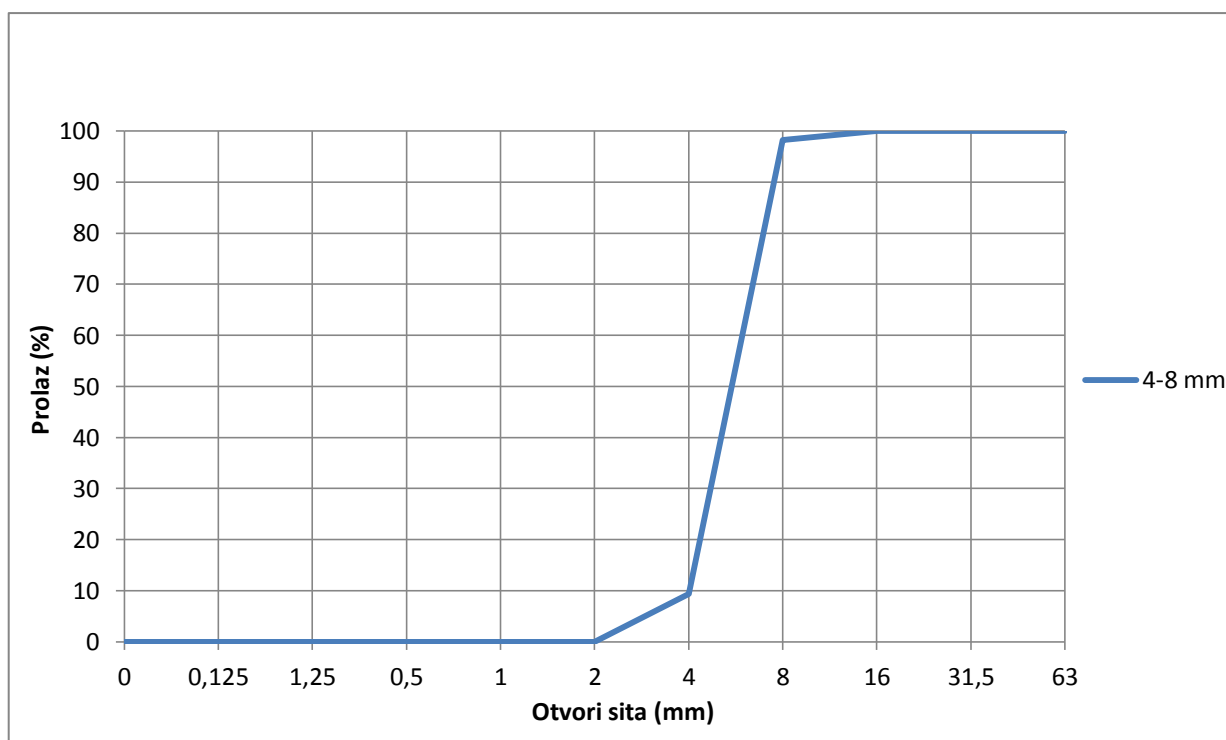
Nasipne gustoće pojedinih frakcija drobljenog agregata su prikazane u tablici 4.3.

Tablica 4.3 Nasipne gustoće frakcija drobljenog agregata

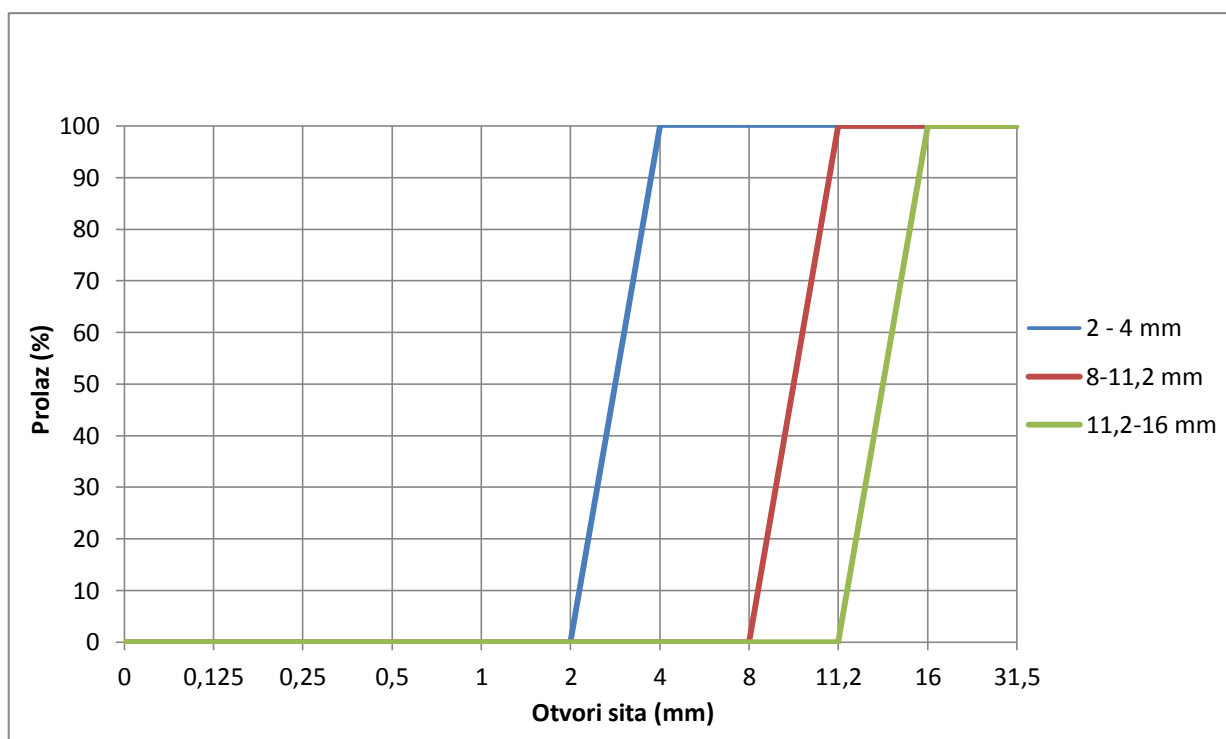
		Frakcije			
		2-4	4-8	8-11.2	11.2-16
Masa	(g)	1970,7	10682,2	10582,6	10688,8
Volumen	(cm <sup>3</sup> )	1327	7073	7073	7073
Nasipna gustoća	(g/cm <sup>3</sup> )	<b>1,49</b>	<b>1,51</b>	<b>1,50</b>	<b>1,51</b>

Upotrebljeni drobljeni i prirodni agregat je s nalazišta Klis – Kosa. U mješavini I-7 smo, uz drobljeni agregat, koristili dekorativni šljunak frakcije 7 – 12 mm. [11]

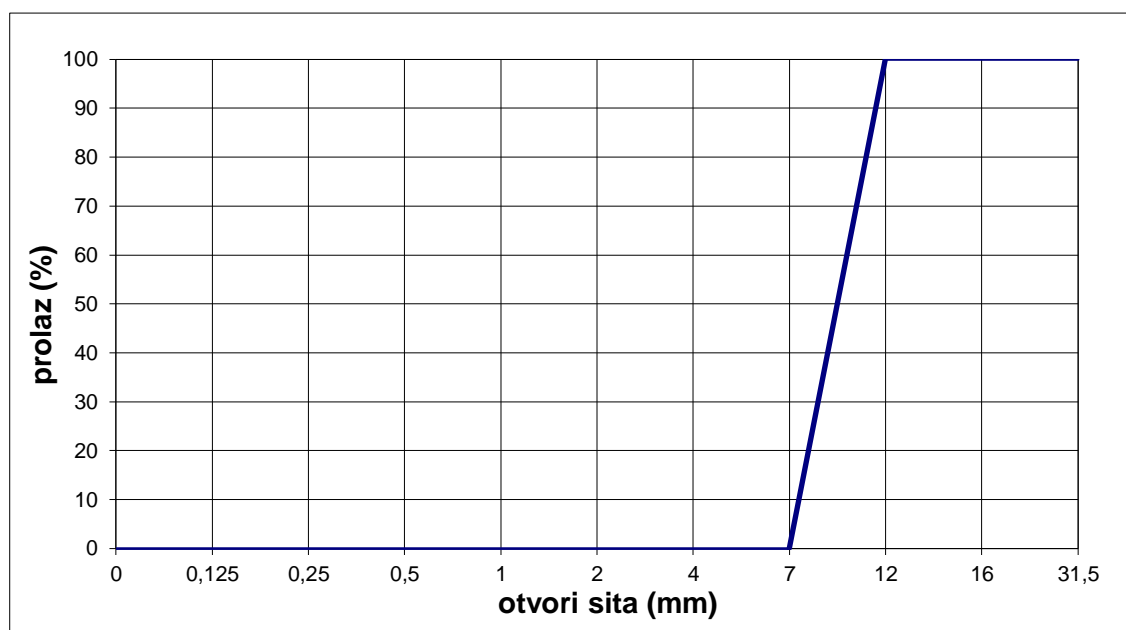
Granulometrijske krivulje svih su prikazane na slici 4.1 – 4.3 .



Slika 4.1 Granulometrijski sastav frakcije 4-8 mm “Klis - Kosa”



Slika 4.2 Granulometrijska krivulja drobljenog agregata frakcija 2-4 mm, 8–11,2 mm 11,2-16 mm



Slika 4.3 Granulometrijska krivulja dekorativnog šljunka, frakcije 7-12 mm

#### 4.2.3 Voda

Prilikom izrade mješavina poroznog betona upotrebljena je voda iz vodovoda, a pa nisu potrebna dodatna ispitivanja kvalitete. Vodocementni (vodovezivni) omjeri, ovisno o mješavini, iznosili su u rasponu između 0,30 - 0,36.

#### 4.2.4 Leteći pepeo

Leteći pepeo je prema postanku industrijski mineralni dodatak, a prema svojstvu spada u pucolane jer aktivno sudjeluje u procesu hidratacije cementa. Leteći pepeo nastaje kao sporedni proizvod u modernim termoelektranama koje imaju pogon na ugljen. Dakle, leteći pepeo je fin prah koji se uglavnom sastoji od čestica sfernog oblika, dobiven izgaranjem ugljena prašine.

Leteći pepeo poboljšava kvalitetu betona. On utječe na poboljšanje plastičnih svojstva betona i obradivost, te smanjuje količinu potrebne vode. Smanjuje segregaciju i izlučivanje vode, te utječe na smanjenje topline hidratacije. Povećava snagu i otpornost betona, a smanjuje propusnost i koroziju armaturnog čelika.

Nekad je cement sa letećim pepelom bio teško dostupan, ali se danas sve više uvodi u proizvodnji građevinskih materijala. Koristi se, ne samo za proizvodnju betona, već i za izgradnju brana i za stabilizaciju zemljišta prije izvođenja različitih tipova građevinskih radova.

[12]

### 4.3 Izrada mješavina poroznog betona

U eksperimentalnom djelu je pripravljeno 8 mješavina poroznog betona.

Mješavine poroznog betona sadrže jednaku količinu cementa, isti vodocementni faktor a razlikuje se po udjelu pojedinih frakcija agregata.

U sljedećim tablicama su prikazani sastavi mješavina poroznog betona za količinu od  $1\text{m}^3$  betona.

Oznaka : PC1- II

Tablica 4.4 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup>	GUSTOJA r	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup>	MASA ZA 20 lit.
		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,07	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,16	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1486	2,68	555	29,73
UKUPNO		1959		1000	39,18

Tablica 4.5 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	100	1486,3	1,25	18,58	0,25	3,72	1471,46	29,43
8 - 16	0	0	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		18,58		3,7	137	2,75

Oznaka : PC2- I2

Tabela 4.6 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup>	GUSTOJA r	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup>	MASA ZA 20 lit.
		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,07	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,16	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1486	2,68	555	29,73
UKUPNO		1959		1000	39,18

Tabela 4.7 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11	100	1486,3	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
11 - 16	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		11,15		1,5	132	2,64

Oznaka : PC3- I3

Tablica 4.8 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOJA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,07	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,16	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1486	2,68	555	29,73
UKUPNO		1959		1000	39,18

Tablica 4.9 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11	0	0	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
11 - 16	100	1486,3	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		11,15		1,5	132	2,64



Oznaka : PC4- I4

Tablica 4.10 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup>	GUSTOJA r	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup>	MASA ZA 20 lit.
		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,07	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,16	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1486	2,68	555	29,73
UKUPNO		1959		1000	39,18

Tablica 4.11 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	70	1040,4	1,25	13,01	0,25	2,60	1030,02	20,60
8 - 11	30	445,9	0,75	3,34	0,10	0,45	443,00	8,86
11 - 16	0	0	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		16,35		3,0	136	2,72

Oznaka : PC5- I5

Tablica 4.12 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup>	GUSTOJA r	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup>	MASA ZA 20 lit.
		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,07	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,16	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1486	2,68	555	29,73
UKUPNO		1959		1000	39,18

Tablica 4.13 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	70	1040,4	1,25	13,01	0,25	2,60	1030,02	20,60
8 - 11	0	0	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
11 - 16	30	445,9	0,75	3,34	0,10	0,45	443,00	8,86
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		16,35		3,0	136	2,72

Oznaka : PC6- I6

Tablica 4.14 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup>	GUSTOJA r	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup>	MASA ZA 20 lit.
		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,07	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,16	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1486	2,68	555	29,73
UKUPNO		1959		1000	39,18

Tablica 4.15 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	100	1486,3	1,25	18,58	0,25	3,72	1471,46	29,43
8 - 16	0	0	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		18,58		3,7	137	2,75

Oznaka : PC7- I7

Tablica 4.16 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup>	GUSTOJA r	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup>	MASA ZA 20 lit.
		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,07	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,16	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1486	2,68	555	29,73
UKUPNO		1959		1000	39,18

Tablica 4.17 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 - 4	15	222,95	1,50	3,34	0,15	0,33	219,94	4,40
4 - 8	0	0	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11	85	1263,4	0,10	1,26	0,00	0,00	1262,11	25,24
11 - 16	0	0	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		4,61		0,3	127	2,54

Oznaka : PC8- I8

Tablica 4.18 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup>	GUSTOJA r	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup>	MASA ZA 20 lit.
		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[kg]
CEMENT		250	3,10	81	5,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,49				
DODACI BETONU					
Leteći pepeo	40,00	100,00	2,25	44,444	2,0000
-	0,00	0,00	1,16	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1454	2,68	542	29,07
UKUPNO		1926		1000	38,52

Tablica 4.19 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	100	1453,7	1,25	18,17	0,25	3,63	1439,12	28,78
7-12	0	0	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Leteći pepeo		100,00					100,00	2,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		250					250	5,00
VODA		123		18,17		3,6	137	2,74

Mješavine poroznog betona su ispitane u svježem i očvrslom stanju.

Ispitivanja svježeg betona se vršilo “metodom kuglice”. Tom metodom se mjerila konzistenciju betona te podešavala količinu vode u mješavine.

Nakon izvršenih ispitivanja konzistencije, beton se ugrađuju u kalupe oblika kocke, i po dva uzoraka od svake mješavine se ugrađuju u kalup oblika valjka.

Mješavine poroznog betona u kalupe su ugrađivane u slojevima pomoću čelične šipke. Pri tome se trebalo voditi računa da šipka ne udara prejako u dno kalupa prilikom ugrađivanja prvog sloja, te da ne ulazi dalje u prethodni sloj prilikom ugradnje ostalih slojeva. Svaki je sloj, visine 1/3 kalupa, nabijan s 25 udaraca.[13] Pri takvom načinu ugradnje nije došlo do segregacije cementne paste.



Slika 4.4 Izrada uzoraka od poroznog betona

Od svake mješavine poroznog betona izrađene su po tri kocke dimenzija 150 x 150 x 150 mm za ispitivanje tlačne čvrstoće, jedna kocka za ispitivanje poroznosti, jedan valjak dimenzija 100 x 200 mm za ispitivanje propusnosti, te jedan valjak dimenzija 110 x 230 mm za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem.

Svi uzorci su nakon 24 h izvađeni iz kalupa i prebačeni u vlažnu komoru, u vodu na temperaturu  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , gdje su čuvani do dana ispitivanja.

## 5 METODE ISPITIVANJA POROZNOG BETONA

Ispitivanja poroznog betona vrši se u svježem i očvrslom stanju.

U svježem stanju ispituje se konzistencija poroznog betona, a u očvrslom stanju se ispituje poroznost i propusnost, te tlačna čvrstoća nakon 28 dana.

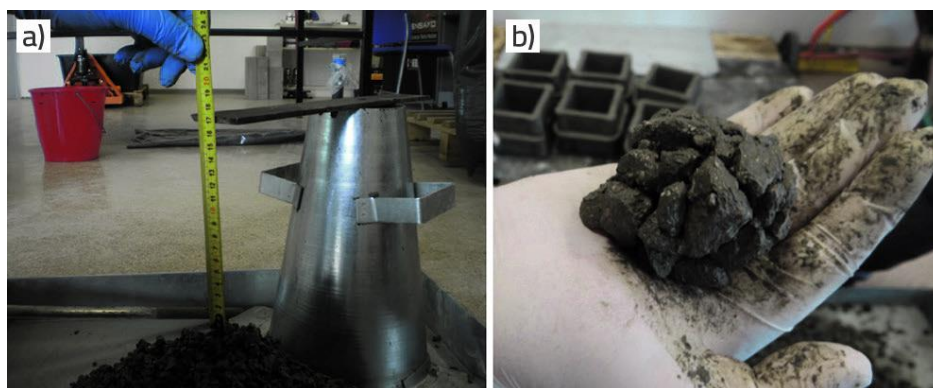
### 5.1 Ispitivanja svježeg poroznog betona

#### 5.1.1 Ispitivanje konzistencije poroznog betona

Ispitivanje konzistencije poroznih betona standardnim metodama za klasične betone daju nerealne rezultate. Čime se dovodi do zaključka da konzistenciju treba ispitati metodom koja je namijenjena posebno poroznim betonima i koja uzima u obzir njegova specifična svojstva. [13]

Ispitivanje konzistencije svježeg poroznog betona može se izvršiti na dva načina:

- Metodom slijeganja
- Metodom kuglice



Slika 5.1 Ispitivanje konzistencije poroznog betona : a) slijeganjem; b) metodom kuglice. [13]

U ovom istraživanju odabrana je „metoda kuglice“. Manja količina poroznog betona je zahvaćena rukom i oblikovana je kuglica koja se promatra na raširenom dlanu. Ako kuglica zadržava svoj oblik, i pri tome ne dolazi do odvajanja zrna i cementnog mlijeka, mješavina ima zadovoljavajuću konzistenciju. [13]

## 5.2 Ispitivanja svojstava očvrslog poroznog betona

### 5.2.1 Ispitivanje poroznosti

Sadržaj pora ima bitnu ulogu u svojstvima očvrslog betona.

Da bi se definirao postotak poroznosti prvo se izračuna volumen uzorka  $V$ . Nakon toga uzorak se stavi u vodu te mu se izmjeri masa  $M_1$ . Nakon što je uzorak ispunjen vodom, vadi se vani i suši 24 sata na temperaturi  $100^{\circ}\text{C}$  do stalne mase  $M_2$ . Poroznost je definirana matematičkim izrazom :

$$P = \left[ 1 - \frac{(M_2 - M_1)}{V} \right] * 100 \quad [\%]$$



Slika 5.2 Mjerenje mase uzorka u vodi i sušenje uzoraka u pećnici

### 5.2.2 Ispitivanje vodopropusnosti

Za ispitivanje propusnosti izrađeni su valjci promjera 100 mm i visine 200 mm. Svi uzorci su bili stari minimalno 7 dana te su držani u vodi do trenutka ispitivanja.

Ispitivanje se vršilo pomoću sprave napravljene u laboratoriju Građevinskog fakulteta u Splitu.



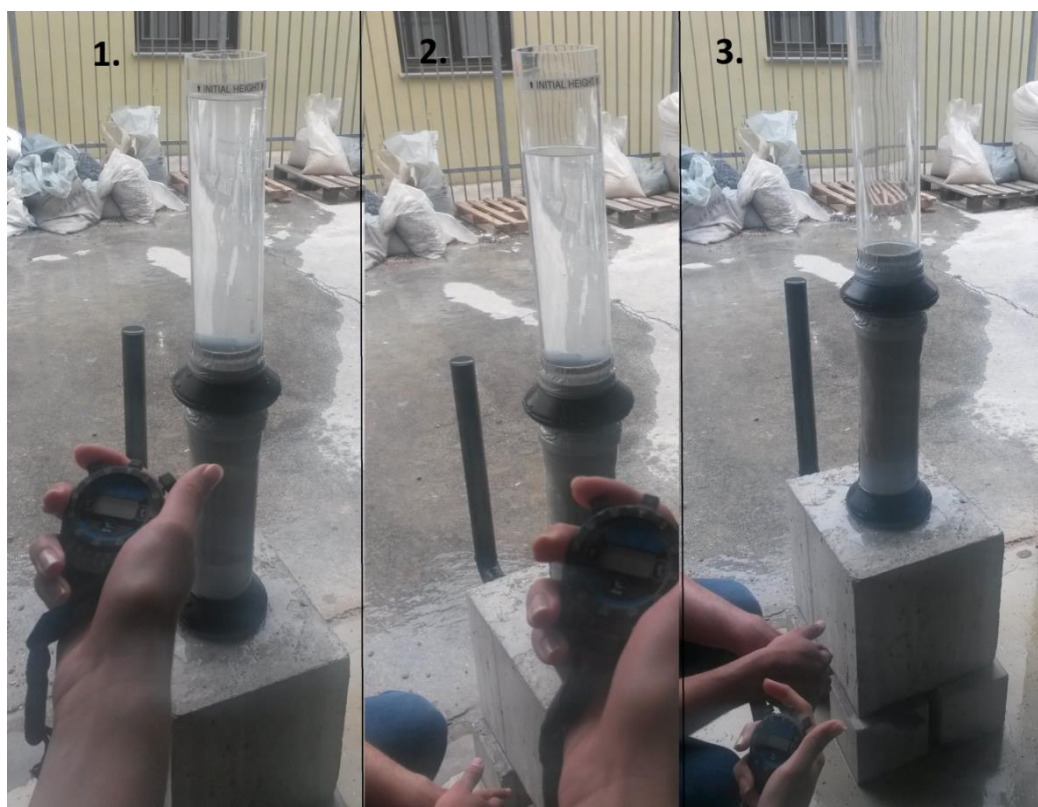
Ispitivanje vodopropusnosti se vrši pomoću dvije metode:

- Metoda padajuće razine stupca vode
- Metode stalne razine stupca vode

#### Metoda padajuće razine stupca vode

Metoda padajuće razine stupca vodom služi za mjerenje koeficijenta propusnosti kod slabo poroznih materijala. Potreba za ovom metodom javlja se zbog problema oko mjerenja vrlo malog protoka kakvi su prisutni kod slabo poroznih materijala. Kod njih je protok vode toliko mali da bi voda koja je prošla kroz uzorak više isparila nego što bi se sakupilo u posudi za mjerenje volumena vode koja je „izašla“ iz uzorka.

Kod ove metode poznata je površina vertikalne cijevi i površina uzorka, koje su u našem slučaju jednake. U cijev ulijemo vodu do označene linije i mjerimo vrijeme potrebno da voda dođe sa razine gornje  $H_g$  do razine donje vode  $H_d$ . [14]



Slika 5.3 Ispitivanje propusnosti metodom padajuće razine stupca vode

Koeficijent propusnosti se zatim računa kao:

$$k = \frac{2}{3} * \frac{L}{t} * \log \frac{H_g}{H_d}$$

gdje je:

k - koeficijent propusnost,

L - visina uzorka,

t - vrijeme potrebno da razina vodnog stupca dođe s gornje do donje razine vode,

H<sub>g</sub> - gornja razina vode,

H<sub>d</sub> - donja razina vode. [14]

#### Metoda stalne razine stupca vode

Metoda stalne razine stupca vode, služi za mjerenje koeficijenta propusnosti poroznih materijala. Kod ove metode uspostavlja se stacionarno strujanje vode kroz uzorak i mjeri se protok q uz uz konstantnu razliku hidrauličkih potencijala. [14]



Slika 5.4 Ispitivanje propusnosti metodom stalne razine stupca vode

Konstantna razlika potencijala osigurava se stalnim održavanjem razine vode do označene linije. Protok vode se dobije mjerenje volumena vode  $V$  koja je protekla u nekom vremenskom intervalu  $\Delta t$ , pa je:

$$q = \frac{V}{\Delta t}$$

U ovom slučaju vremenski interval  $\Delta t$  iznosio je 30 sekundi.

Primjenom Darcyevog zakona slijedi da je :

$$k = \frac{V * L}{H_g * A * \Delta t}$$

gdje je:

$k$  - koeficijent propusnosti,

$V$ - volumen uzorka,

$L$  - visina uzorka,

$H_g$  - razina gornje vode,

$A$  – površina poprečnog presjek uzorka

$\Delta t$ - vremenski interval u kojem se mjeri količina vode koja je istekla. [14]

### 5.2.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća je ispitana na tri uzorka oblika kocke, dimenzija 150 x 150 x 150 mm. Prije ispitivanja, uzorci su izvagani te su im izmjerene dimenzije. Ispitivanje je provedeno nakon 28 dana pomoću preše prikazane na slici 5.5. Ispitanim uzorcima nisu prethodno brušene stranice te se pretpostavlja da je to imalo nekakav utjecaj na dobivene rezultate.

Kod poroznih betona postupak brušenja površina preko kojih se prenosi opterećenje je vrlo bitan. Zbog veličine pora, veća je vjerojatnost da površina nije ravna i da se opterećenje ne prenosi preko cijele površine, već preko izbočenog zrna ili nekoliko zrna agregata. Uslijed pomaka zrna agregata, preša evidentira lom uzorka. Na taj način je moguće dobiti tlačnu čvrstoću poroznog betona, koja je manja od stvarne tlačne čvrstoće. [13]



Slika 5.5 Preša za mjerenje tlačne čvrstoće

Uzorci se postavljaju na sredinu preše, okomito na smjer ugradnje kako bi opterećenje koje se nanosi bilo ujednačeno. Opterećenje se nanosi jednoliko, bez udara. Maksimalna sila  $F$ , pri kojoj je došlo do loma, bilježi se kao rezultat pokusa.

Tlačna čvrstoća se računa prema izrazu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} [N/mm^2]$$

gdje je:

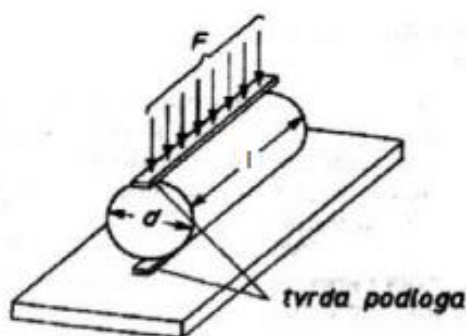
$f_c$  – tlačna čvrstoća betona,

$F$  – maksimalno opterećenje pri slomu,

$A_c$  – površina uzorka.

#### 5.2.4 Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Vlačna čvrstoća se ispituje na valjku dimenzija  $d/l = 110 \times 230$  mm. Shema ispitivanja vlačne čvrstoće je prikazana na slici 5.6. [15]



Slika 5.6 Shema ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem [15]

Vlačna čvrstoća se računa prema izrazu:

$$f_{tc} = \frac{2 \cdot F}{d \cdot l \cdot \pi}$$

gdje je :

$f_{tc}$  - vlačna čvrstoća cijepanjem,

$F$  - sila pri kojoj dolazi do cijepanja,

$d$  - promjer valjka,

$L$  - duljina valjka. [15]



Slika 5.7 Preša za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

## 6 REZULTATI I ANALIZA REZULTATA POROZNOG BETONA

### 6.1 Rezultati ispitivanje svojstva poroznog betona u svježem stanju

#### 6.1.1 Ispitivanje konzistencije „metodom kuglice“

Sve mješavine sadrže jednaku količinu cementa, a količina vode se regulirala „metodom kuglice“. Reguliranjem količine vode mijenja se početni odnos komponenti u ukupnom volumenu te mješavine, te su se nakon uspostavljanja novih odnosa dobile korigirane vrijednosti vodocementnog faktora. Tako da svaka mješavina ima različiti vodocementni faktor.

Konzistencija svježeg betona je ispitana na svim mješavinama te neki uzorci nisu pokazali zadovoljavajuću konzistenciju.

#### Mješavina I-1

Prva mješavina sadrži:

- 7 kg cementa
- 29,43 kg drobljenog agregata, frakcije 4 – 8 mm
- 2,51 kg vode
- Masa uzorka ( $M_b$ ) iznosi 6,693 kg

Vodocementni faktor ( $w/c$ ) iznosi 0,36. Ova mješavina sadrži veću količinu vode pa dolazi do odvajanja zrna, te se ne može oblikovati grudica na ruci.



Slika 6.1 Mješavina I-1

### Mješavina I-2

Druga mješavina sadrži:

- 7 kg cementa
- 29,53 kg drobljenog agregata, frakcije 8 – 11,2 mm
- 2,30 kg vode
- Masa uzorka ( $M_b$ ) iznosi 6,387 kg

Vodocementni faktor (w/c) iznosi 0,33. Ova mješavina poroznog betona je masnija, tj. izražen je sadržaj cementa u odnosu na sadržaj vode. Kod ove mješavine se može oblikovati grudica na ruci.



Slika 6.2 Mješavina I-2



### Mješavina I-3

Treća mješavina sadrži:

- 7 kg cementa
- 29,53 kg drobljenog agregata, frakcije 11,2 - 16 mm
- 2,25 kg vode
- Masa uzorka ( $M_b$ ) iznosi 6,809 kg

Vodocementni faktor (w/c) iznosi 0,32. Ova mješavina je, zbog krupnog sadržaja agregata, teško obradiva, te se teško ugrađuje u kalupe. Kod ove mješavine se može oblikovati grudica na ruci.



Slika 6.3 Mješavina I-3

### Mješavina I-4

Četvrta mješavina sadrži:

- 7 kg cementa
- 20,60 kg drobljenog agregata, frakcije 4 - 8 mm
- 8,86 kg drobljenog agregata, frakcije 8 – 11,2 mm
- 2,22 kg vode
- Masa uzorka ( $M_b$ ) iznosi 6,730 kg

Vodocementni faktor (w/c) iznosi 0,32. Kod ove mješavine se nije mogla oblikovati grudica na ruci.



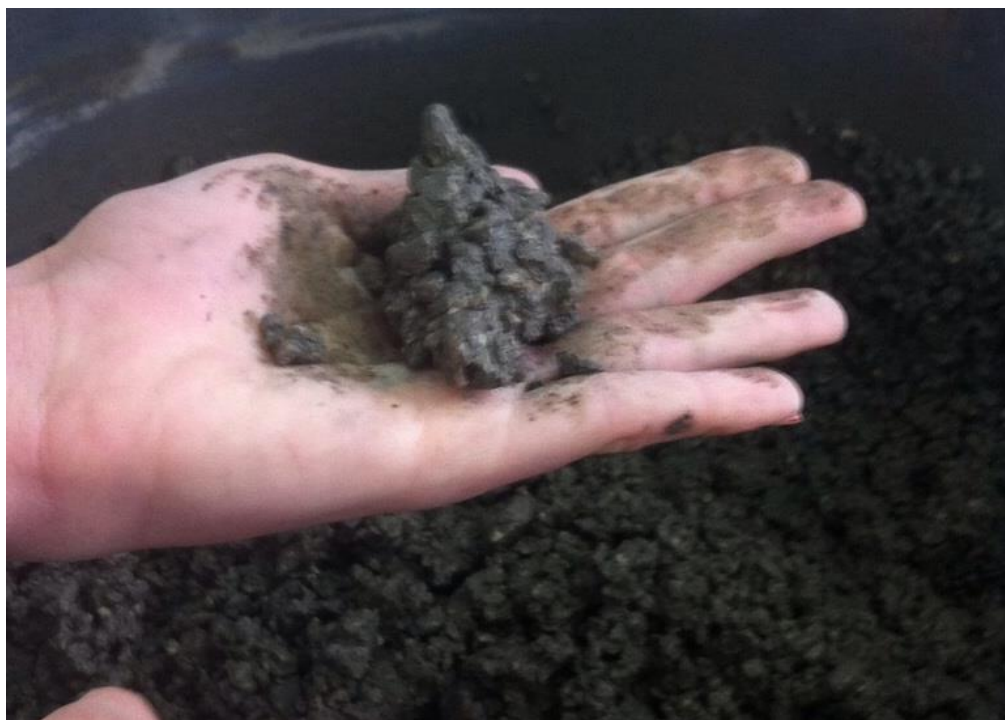
Slika 6.4 Mješavina I-4

### Mješavina I-5

Peta mješavina sadrži:

- 7 kg cementa
- 20,60 kg drobljenog agregata, frakcije 4 - 8 mm
- 8,86 kg drobljenog agregata, frakcije 11,2 – 16 mm
- 2,16 kg vode
- Masa uzorka ( $M_b$ ) iznosi 6,656 kg

Vodocementni faktor (w/c) iznosi 0,31. Za razliku od četvrte mješavine, ova mješavina postiže bolju konzistenciju s manjom količinom vode jer je korišten agregat veće frakcije. Kod ove mješavine se može oblikovati grudica na ruci.



Slika 6.5 Mješavina I-5

### Mješavina I-6

Šesta mješavina sadrži:

- 7 kg cementa
- 29,43 kg prirodnog agregata, frakcije 4 - 8 mm
- 2,24 kg vode
- Masa uzorka ( $M_b$ ) iznosi 6,462 kg

Vodocementni faktor (w/c) iznosi 0,32. Prirodni agregat, za razliku od drobljenog, traži manju količinu vode za istu obradivost. Kod ove mješavine se teško oblikuje grudica jer dolazi do razdvajanja zrna, te je još trebalo dodat vode da bi se postigla željena konzistencija.



Slika 6.6 Mješavina I-6

Mješavina I-7

Sedma mješavina sadrži:

- 7 kg cementa
- 4,40 kg drobljenog agregata, frakcije 2 – 4 mm
- 25,25 kg dekorativnog mramornog šljunka, frakcije 7-12 mm
- 2,08 kg vode
- Masa uzorka ( $M_b$ ) iznosi 6,852 kg

Vodocementni faktor (w/c) iznosi 0,30. Kod ove mješavine se može oblikovati grudica na ruci.



Slika 6.7 Mješavina I-7



Mješavina I-8

Osma mješavina sadrži:

- 7 kg cementa
- 29,53 kg drobljenog agregata, frakcije 4 – 8 mm
- 2 kg letećeg pepela
- 2,47 kg vode
- Masa uzorka ( $M_b$ ) iznosi 6,625 kg

Vodovezivni faktor (w/v) iznosi 0,35. Kod ove mješavine se ne može oblikovati grudica na ruci.



Slika 6.8 Mješavina I-8

## 6.2 Rezultati ispitivanja svojstva poroznog betona u očvrslom stanju

### 6.2.1 Ispitivanje poroznosti

Ispitivanje poroznosti se vršilo prema metodi opisanoj u poglavlju 5.2.1.

U prethodnim istraživanjima je definirano da se poroznost ovakvih betona kreće između 11% i 35%. [5] Iz tablice je vidljivo da sve mješavine zadovoljavaju kriterijima poroznosti, koje se kreću u rasponu od 25,6% do 31,7%.

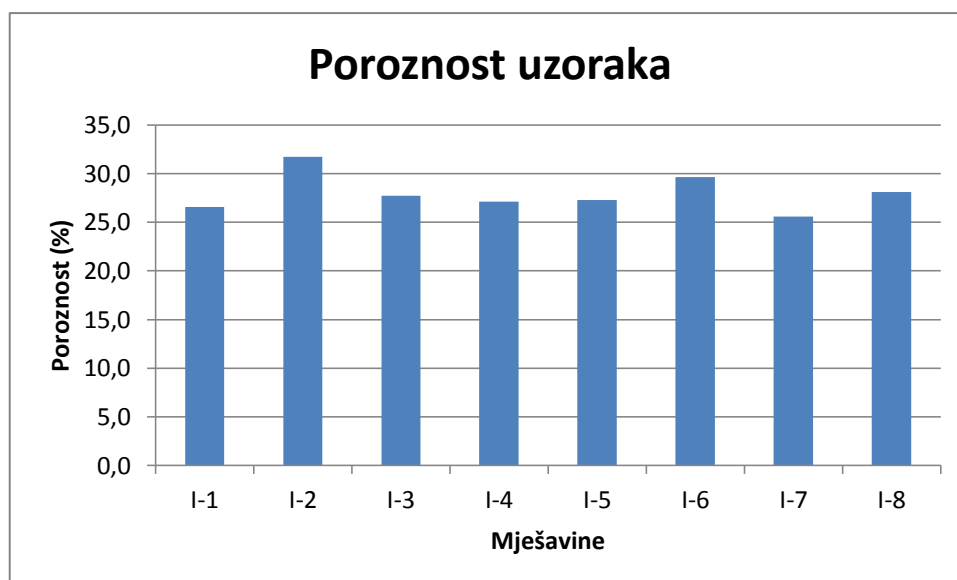
Najveću poroznost ima mješavina I-2 koja sadrži frakciju od 8-11,2 mm. Iako se realno očekivalo da će najveću poroznost ima mješavina koja sadrži najveća zrna agregata, frakcije 11,2-16 mm.

Mješavina I-7 je najmanje porozna. Razlog tome je što ona sadrži 15% zrna sitne frakcije 2-4 mm, koja popunjavaju praznine između krupnijih frakcija agregata te dolazi do povećanja vezivnog područja između cementa i agregata.

Također je vidljivo da leteći pepeo utječe na poroznost. Mješavina I-1 i I-8 imaju istu frakciju agregata 4-8 mm, ali u zadnjoj mješavini je dodan leteći pepeo te je poroznost povećana za 5,3 %.

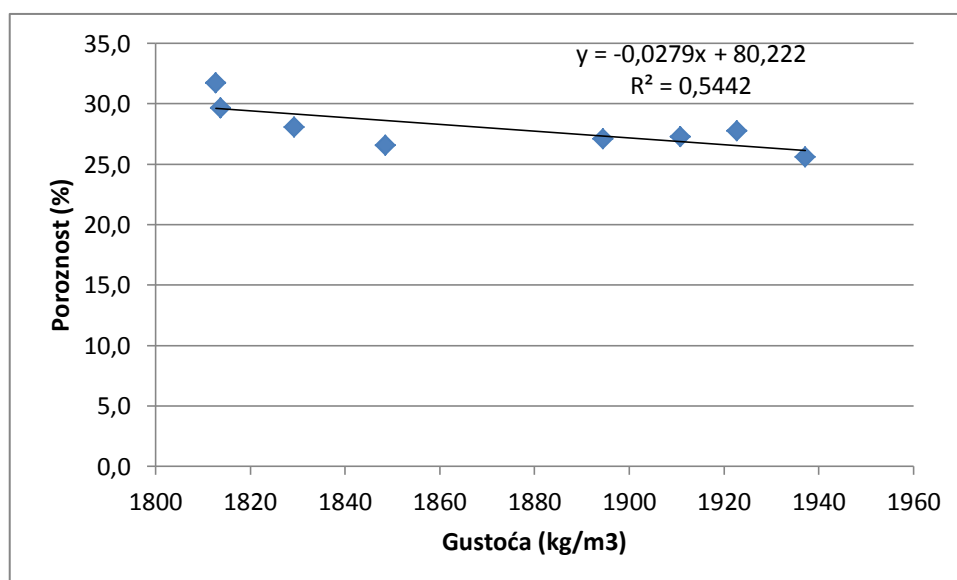
Tablica 6.1 Rezultati ispitivanja poroznost

Oznake	Masa u vodi	Masa na zraku	Dimenzije			Volumen	Poroznost	Gustoća
-	(g)	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	mm <sup>3</sup>	(%)	kg/m <sup>3</sup>
I-1	3823	6343	150	150	152,5	3431250	26,6	1848,597
I-2	3878	6220	150	150	152,5	3431250	31,7	1812,75
I-3	4091	6554	150	150	151,5	3408750	27,7	1922,699
I-4	3973	6458	150	150	151,5	3408750	27,1	1894,536
I-5	4021	6492	150	150	151,0	3397500	27,3	1910,817
I-6	3797	6203	150	150	152,0	3420000	29,6	1813,743
I-7	4081	6625	150	150	152,0	3420000	25,6	1937,135
I-8	3772	6215	150	150	151,0	3397500	28,1	1829,286



Slika 6.9 Poroznost uzoraka

Na slici 6.10 je prikazana ovisnost gustoće i poroznosti uzoraka. Veza je približno linearna, a iz vrijednosti  $R=0,74$  se vidi dobra korelacija između poroznosti i gustoće. U ovom slučaju korelacija je negativna, što je i očekivan rezultat.



Slika 6.10 Ovisnost gustoće i poroznosti uzorka



Na sljedećim slikama prikazani su uzorci koji su dobiveni cijepanjem valjka. Na njima je vidljiv sadržaj i raspored šupljina.

Prva mješavina I-1 ima manju poroznost (26,6%) u odnosu na ostale vrijednosti.



Slika 6.11 Mješavina I-1



Druga mješavina I-2 ima najveću poroznost (31,7%). Ona sadrži krupniji agregat, frakcije 8-11,2 mm pa je bilo realno za očekivat da će imati veću poroznost.

U prethodnim istraživanjima je također definirana veza između poroznosti i veličine agregata. Iz tablice 3.10 se vidi da uzorci s manjom količinom agregata imaju manju propusnost [9], tj. sadržaj šupljina se povećava s povećanjem zrna agregata. [2]



Slika 6.12 Mješavina I-2

Treća mješavina I-3 ima manju poroznost od druge mješavine (27,7%), iako sadrži krupniji agregat frakcije 11,2-16 mm. Razlog tome može biti veći sadržaj paste koji je ispunio pore među zrnima te se na taj način smanjio postotak poroznosti.



Slika 6.13 Mješavina I-3



Četvrta mješavina I-4 se sastoji od frakcija 4-8 mm i 8-11,2 mm u omjeru 70/30, te njezina poroznost iznosi 27,1%. Na slici 6.14 je vidljivo da uzorak sadrži manji broj sitniji šupljina. To je bilo realno za očekivat je mješavinu čini 70% sitniji agregat koji smanjuje sadržaj šupljina.



Slika 6.14 Mješavina I-4

Peta mješavina I-5 sadrži diskontinuitet među frakcijama agregata. Njena poroznost iznosi 27,3% te se može zaključiti da diskontinuitet malen i ne utječe znatno na rezultat poroznost. Rezultat je gotovo identičan kao i kod prethodne mješavine.



Slika 6.15 Mješavina I-5

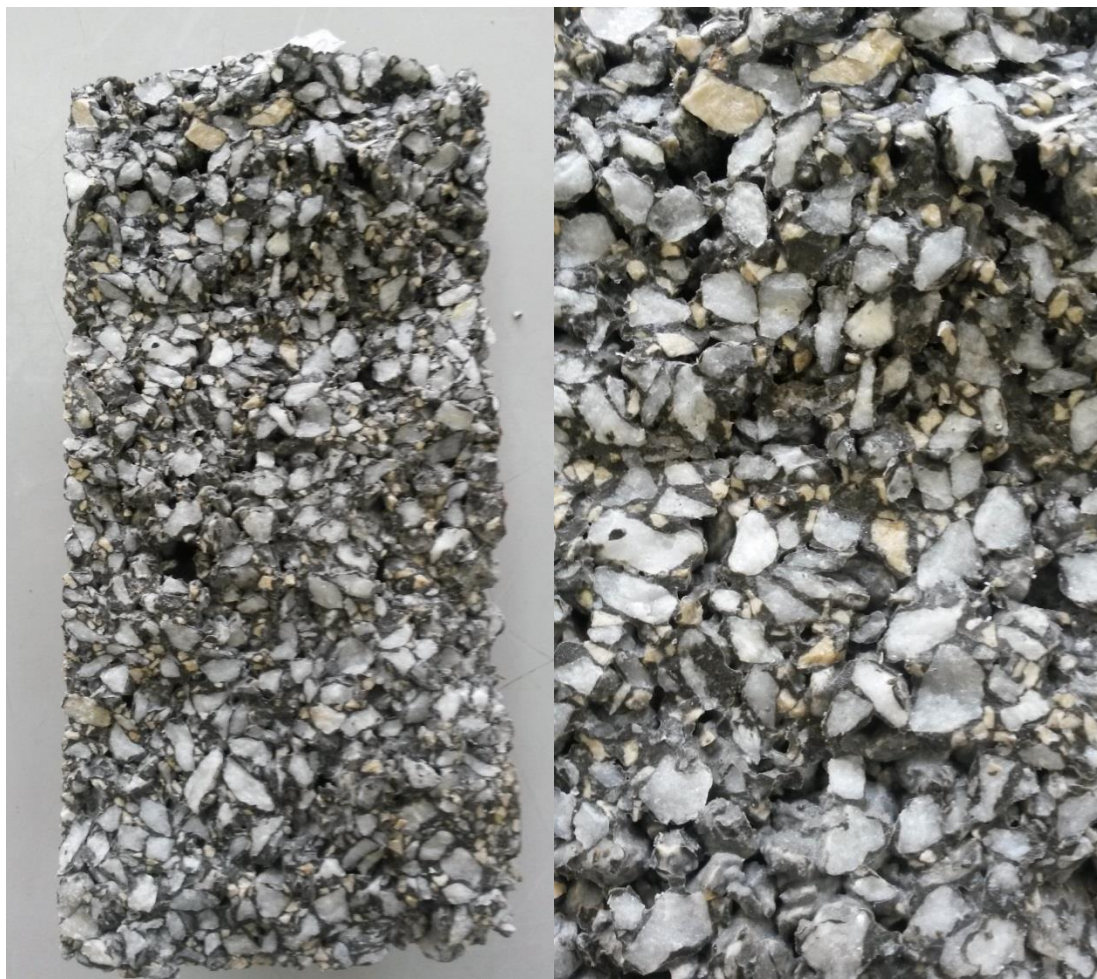


Šesta mješavina I-6 sadrži prirodni agregat frakcije 4-8 mm te njezina propusnost iznosi 29,6%. Ova mješavina, u kojoj je korišten prirodni agregat frakcije 4-8 mm, ima veću propusnost od mješavine I-1 koja sadrži drobljeni agregat jednake frakcije.



Slika 6.16 Mješavina I-6

Sedma mješavina I-7 ima najmanju poroznost (25,6%). Ona sadrži sitni agregat frakcije 2-4 mm i mramorne dekorativne granule frakcije 7-12 mm. Sitnija zrna frakcije smanjuju sadržaj šupljina pa je realno za očekivat da ova mješavina ima najmanju poroznost.



Slika 6.17 Mješavina I-7



Osma mješavina I-8 uz agregat veličine 4-8 mm sadrži i leteći pepeo. Njena propusnost iznosi 28,1% te se može zaključiti da dodatak letećeg pepela povećava sadržaj šupljina u mješavini, u odnosu na prvu mješavinu.



Slika 6.18 Mješavina I-8



### 6.2.2 Ispitivanje propusnosti

U tablici 6.2 su prikazani rezultati ispitivanja propusnosti poroznog betona. Prva metoda predstavlja metodu padajuće razine stupca vode, a druga je metoda stalne razine stupca vode.

Rezultati dobiveni drugom metodom, prema litetaruri [13] uzimaju se kao mjerodavni budući da je voda tekla pod stalnim tlakom stupca tekućine te uvijek jednakom površinom poprečnog presjeka uzorka.

U prethodnim istraživanjima je definirano da se koeficijent propusnosti kreće u rasponu od 2,5-33 mm/s. [16] Prema tome, sve mješavine zadovoljavaju kriterij propusnosti.

Koeficijenti propusnosti  $K_1$  kod prve metode kreću se u rasponu od 2,31-12,65 mm/s, a kod druge metode  $K_2$  iznosi od 1,91-10,86 mm/s.

Kod mješavina s jednofrakcijskim agregatom, veću su propusnost imali betoni veće nazivne frakcije. Najveću propusnost ima mješavina I-3. To je bilo realno za očekivat jer mješavina sadrži krupni agregat frakcije 11,2-16 mm koji stvara veći sadržaj pora.

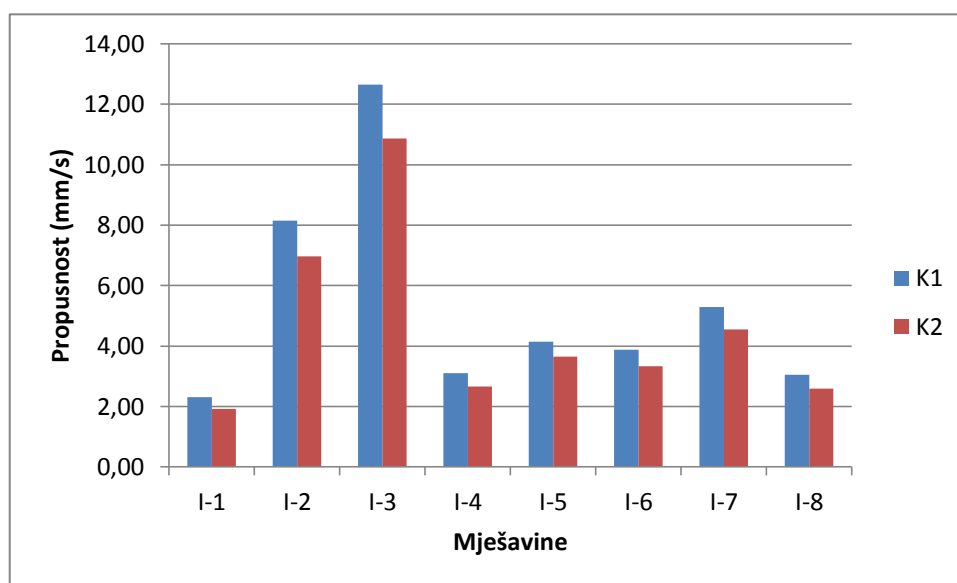
Najmanju propusnost ima mješavina I-1, gdje je korišten drobljeni agregat frakcije 4-8 mm. Iz toga je vidljivo da se propusnost smanjuje sa smanjivanjem veličine zrna agregata. Mješavina I-6, u kojoj je korišten prirodni agregat frakcije 4-8 mm, ima veću propusnost od mješavine I-1 koja sadrži drobljeni agregat jednake frakcije.

Takoder je vidljivo da leteći pepeo utječe na propusnost. Mješavina I-1 i I-8 imaju istu frakciju drobljenog agregata 4-8 mm, ali u zadnjoj mješavini je dodan leteći pepeo te je propusnost povećana za 24,3 %.

Propusnost ja najmanja za vodocementni faktor od 0,36. Najveća propusnost se može dobiti koristeći vodocementni faktor 0,32. Iz toga se vidi da propusnost raste kako se vodocementni faktor smanjuje. Što je vodocementni faktor veći, veziva imju veliku fluidnost te višak veziva blokira put čime se smanjuje propusnost vode, što je u skladu literaturom [4]. U literaturi [9] je prikazan odnos w/c faktora i propusnosti (slika 3.5) te su dobiveni drugačiji rezultati. Navedeno je da se w/c faktor od 0,34 može uzeti kao granična vrijednost, nakon kojeg propusnost poroznog betona raste, tj. veća propusnost se može dobiti koristeću w/c faktore u rasponu od 0,34 do 0,38.

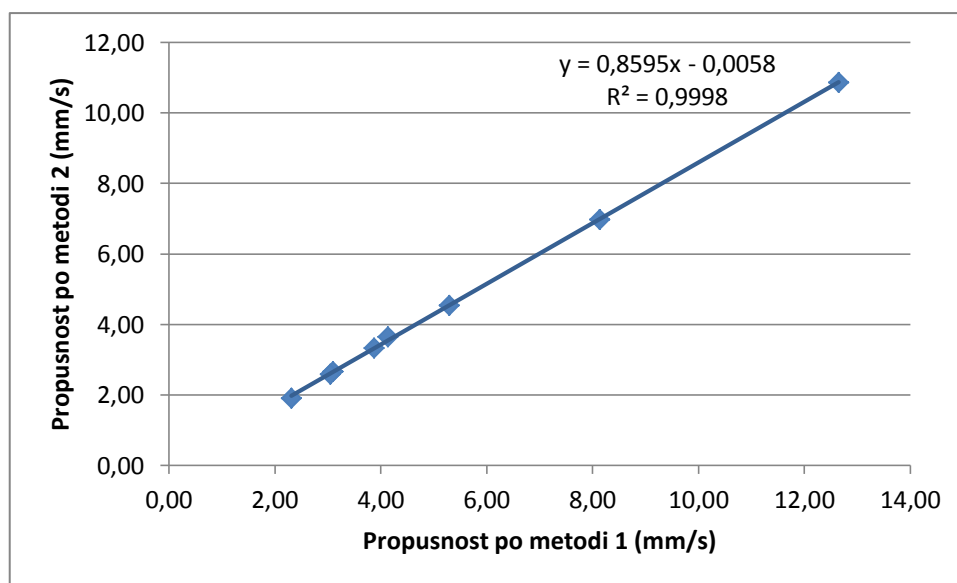
Tablica 6.2 Rezultati ispitivanja propusnosti

Oznaka	Uzorak			Metoda 1				Metoda 2		
	Promjer	Visina	Površina	H <sub>g</sub>	H <sub>d</sub>	Vrijeme	K <sub>1</sub>	Volumen	Vrijeme	K <sub>2</sub>
-	(mm)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(mm)	(mm)	(s)	(mm/s)	(mm <sup>3</sup> )	(s)	(mm/s)
I-1	103	200,0	8332,3	300	100	95	2,31	718000	30	1,91
I-2	103	200,3	8332,3	300	100	27	8,14	2610000	30	6,97
I-3	103	196,0	8332,3	300	100	17	12,65	4156000	30	10,86
I-4	103	206,3	8332,3	300	100	73	3,10	970000	30	2,67
I-5	103	192,3	8332,3	300	100	51	4,14	1422000	30	3,65
I-6	103	197,7	8332,3	300	100	56	3,87	1264000	30	3,33
I-7	103	202,7	8332,3	300	100	42	5,30	1683000	30	4,55
I-8	103	194,3	8332,3	300	100	70	3,05	999000	30	2,59



Slika 6.19 Propusnost uzoraka po metodi 1 i metodi 2

Na slici 6.20 je prikazana ovisnost propusnosti po metodi 1 i metodi 2. Veza je približno linearna, a iz vrijednosti  $R=0,99$  se vidi dobra korelacija između te dvije metode. U ovom slučaju korelacija je pozitivna.



Slika 6.20 Ovisnost propusnosti po metodi 1 i metodi 2

### 6.2.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća je ispitana na svim uzorcima prema uvjetima opisanim u prethodnom poglavlju.

Kod jednofrakcijskih betona, veću tlačnu čvrstoću imaju betoni manje nazivne frakcije. Najveću tlačnu čvrstoću ima mješavina I-1 koja sadrži sitniji agregat, frakcije 4-8 mm. Najmanju tlačnu čvrstoću ima mješavina I-2 koja sadrži drobljeni agregat frakcije 8-11,2 mm. Iako je bilo realno za očekivat da najmanju tlačnu čvrstoću ima mješavina I-3 sa najvećom nazivnom frakcijom 11,2-16 mm, što je u skladu s literaturom [4] u kojoj se navodi da se tlačna čvrstoća smanjuje kako se ukupna veličina zrna povećava.

Iz tablice 6.3 je vidljivo da diskontinuitet među frakcijama utječe na tlačnu čvrstoću. Prema tome, mješavina I-4 kod koje nije prisutan diskontinuitet ima veću tlačnu čvrstoću od mješavine I-5 kod koje se javlja diskontinuitet.

U ovom istraživanju se pokazalo da mješavina I-6 koja sadrži prirodni agregat ima manju tlačnu čvrstoću od mješavine I-1 koja sadrži drobljeni agregat iste frakcije.

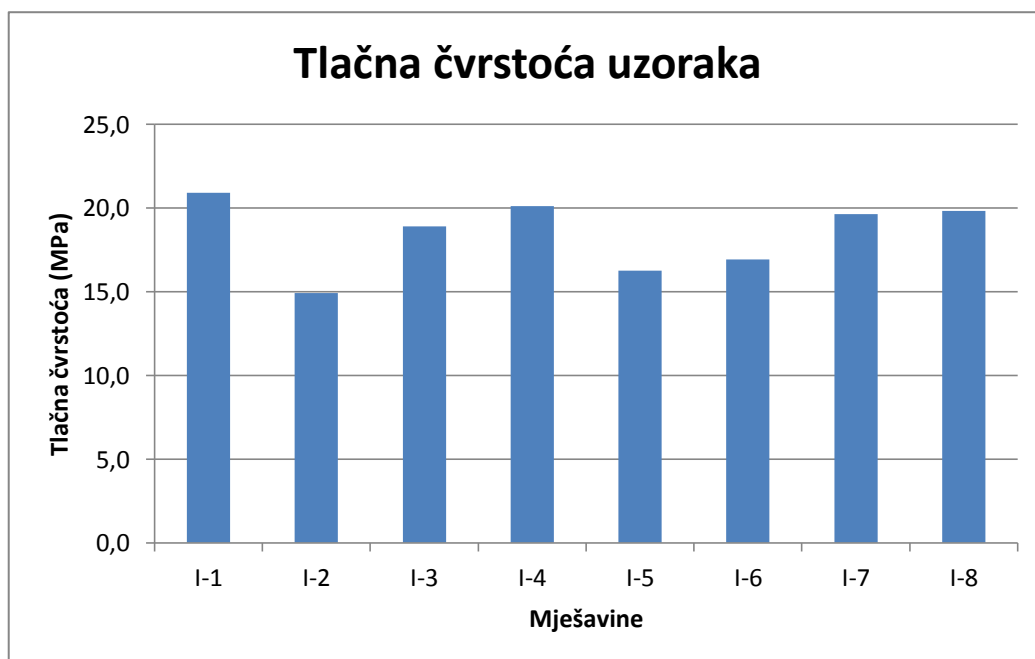
U mješavini I-7 je dodan manji sadržaj sitnije frakcije 2-4 mm, te je bilo očekivano da će ta mješavina postići veću tlačnu čvrstoću.

U ispitivanju je pokazano da leteći pepeo negativno utječe na tlačnu čvrstoću. To se može pokazati uspoređujući mješavine I-1 i I-8. Mješavina I-1 i I-8 imaju istu frakciju drobljenog

agregata 4-8 mm, ali u zadnjoj mješavini je zamjenjen dio cementa sa letećim pepelom te je tlačna čvrstoća smanjena za 5,2%. S obzirom da je poroznost ove mješavine povećana u odnosu na mješavinu I-1, smanjena čvrstoća je očekivana.

Tablica 6.3 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Oznaka	Masa	Tlačna čvrstoća $f_c$	Sila loma F
-	(g)	(Mpa)	(N)
I-1	6809,0	20,9	470,20
I-2	6557,7	14,9	335,30
I-3	6887,3	18,9	425,33
I-4	6911,3	20,1	452,20
I-5	6837,7	16,3	365,33
I-6	6644,0	16,9	380,67
I-7	7017,3	19,6	441,63
I-8	6787,7	19,8	445,97



Slika 6.21 Tlačna čvrstoća uzoraka

### 6.2.4 Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem se vršilo prema metodi opisanoj u poglavlju 5.2.4.

Najmanju tlačnu čvrstoću ima mješavina I-5 koja sadrži drobljeni agregat frakcije 4-8 mm i 11,2-16 mm u omjeru 70/30. Najveću vlačnu čvrstoću ima mješavina I-7 koja sadrži drobljeni agregat frakcije 2-4 mm i mramorne dekorativne granule 7-12 mm, u omjeru 15/85. Razlog tome je što ova mješavina sadrži sitnije čestice agregata koje pozitivno utječu na vlačnu čvrstoću.

Iz tablice 6.4 se vidi da leteći pepeo neznatno utječe na vlačnu čvrstoću. Mješavina I-1 i I-8 imaju istu frakciju drobljenog agregata 4-8 mm, ali u zadnjoj mješavini je dodan leteći pepeo te je vlačna čvrstoća povećana za 5,2 %.

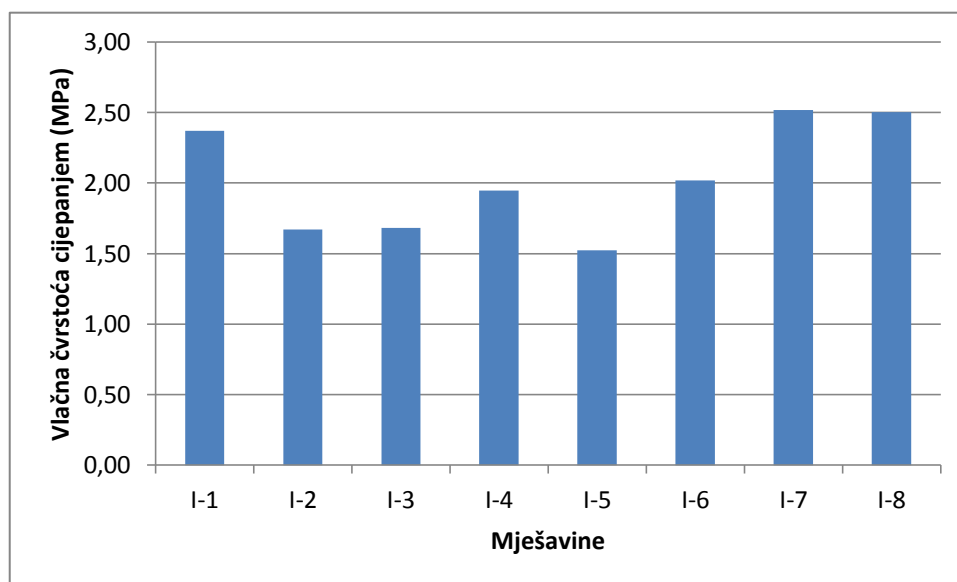
Iz tablice 6.3 je vidljivo da diskontinuitet među frakcijama utječe na vlačnu čvrstoću. Prema tome, mješavina I-4 kod koje nije prisutan diskontinuitet ima veću vlačnu čvrstoću od mješavine I-5 kod koje se javlja diskontinuitet.

U ovom istraživanju se pokazalo da mješavina I-6 koja sadrži prirodni agregat ima manju vlačnu čvrstoću od mješavine I-1 koja sadrži drobljeni agregat iste frakcije.

Vodocementni faktor mješavine I-5, koja ima najmanju vlačnu čvrstoću, iznosi 0,31 a od mješavine I-7 s najvećom vlačnom čvrstoćom iznosi 0,35.

Tablica 6.4 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

Oznaka	Masa	Promjer	Visina	Volumen	Gustoća	F	$f_{ct}$
	(g)	(mm)	(mm)	(cm <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kN)	(MPa)
I-1	4805	113	230	2305,4	2084,20	96,7	2,37
I-2	4592	114	231	2356,6	1948,55	69,1	1,67
I-3	4632	114	232	2366,8	1957,05	69,8	1,68
I-4	4633	114	228	2326,0	1991,81	79,4	1,95
I-5	4554	114	227	2315,8	1966,47	61,9	1,52
I-6	4627	114	228	2326,0	1989,23	82,4	2,02
I-7	4663	114	228	2326,0	2004,71	102,8	2,52
I-8	4732	112	231	2274,7	2080,31	101,6	2,50

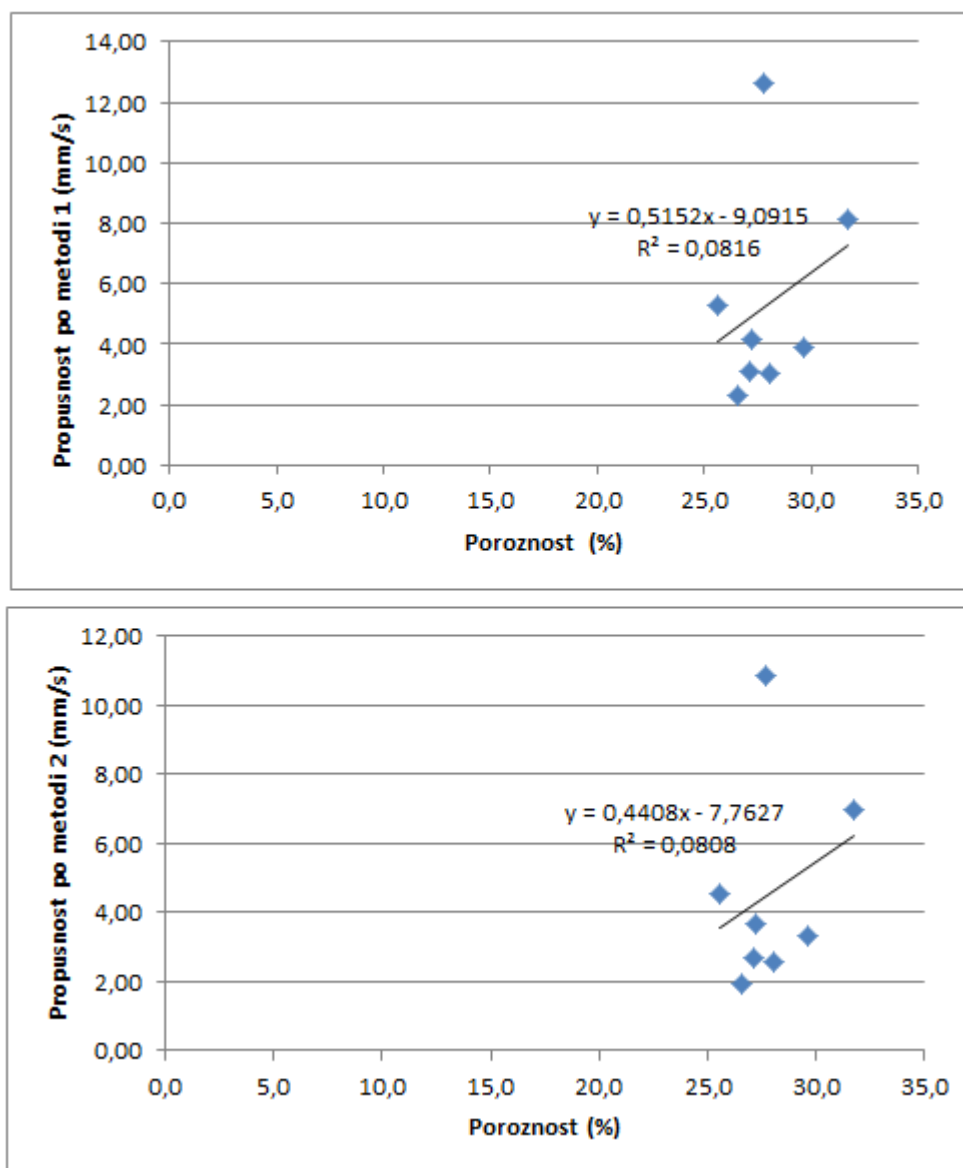


Slika 6.22 Vlačna čvrstoća cijepanjem

### 6.2.5 Veza između poroznosti i propusnosti

U prethodnim istraživanjima postoji proporcionalna veza između poroznosti i propusnosti. Dokazano je da s porastom broja šupljina raste i propusnost. [4]

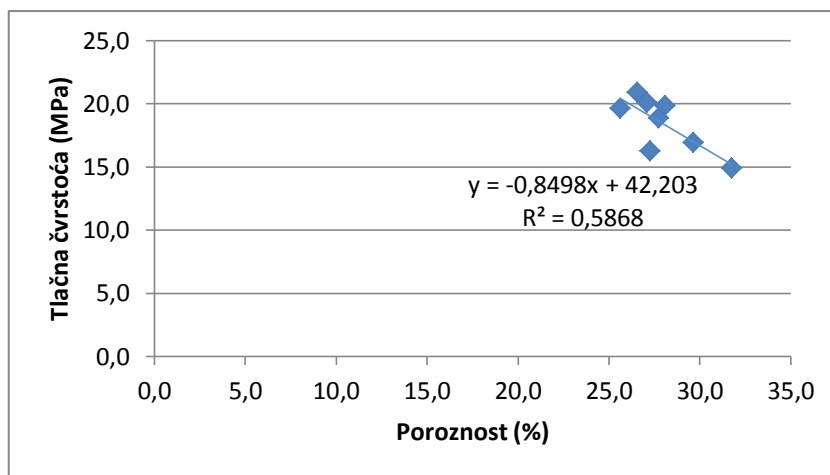
U ovom istraživanju ta veza nije izražena za sve mješavine. Na slici 6.23 se vidi da ne postoji dobra korelacija između poroznosti i propusnosti.



Slika 6.23 Veza između poroznosti i propusnosti

### 6.2.6 Veza između poroznosti i tlačne čvrstoće

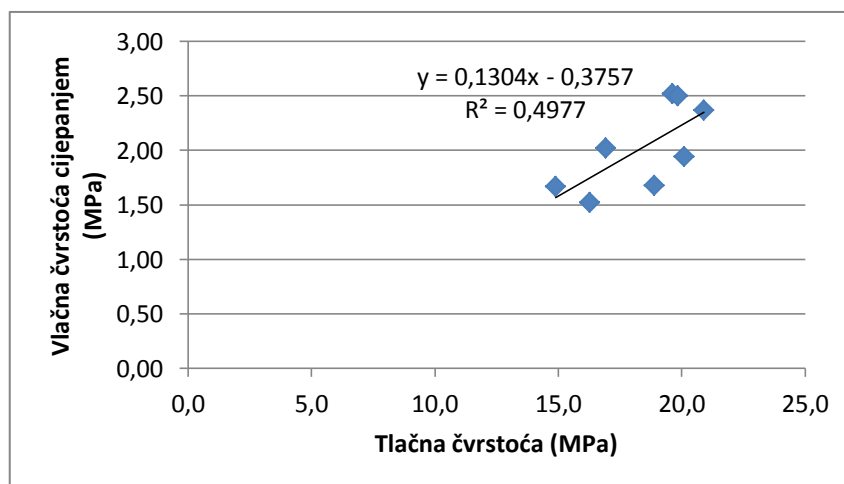
U ovom istraživanju je definirano da se tlačna čvrstoća smanjuje kako se poroznost povećava. To je jasno prikazano na slici 6.24. Veza je približno linearna, a iz vrijednosti  $R=0,77$  se vidi postoji dobra korelacija između poroznosti i tlačne čvrstoće.



Slika 6.24 Veza između poroznosti i tlačne čvrstoće

### 6.2.7 Veza između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem

Na slici 6.25 je vidljivo da postoji ovisnost između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem. Iz vrijednosti  $R=0,71$  se vidi korelacija između te dvije čvrstoće.

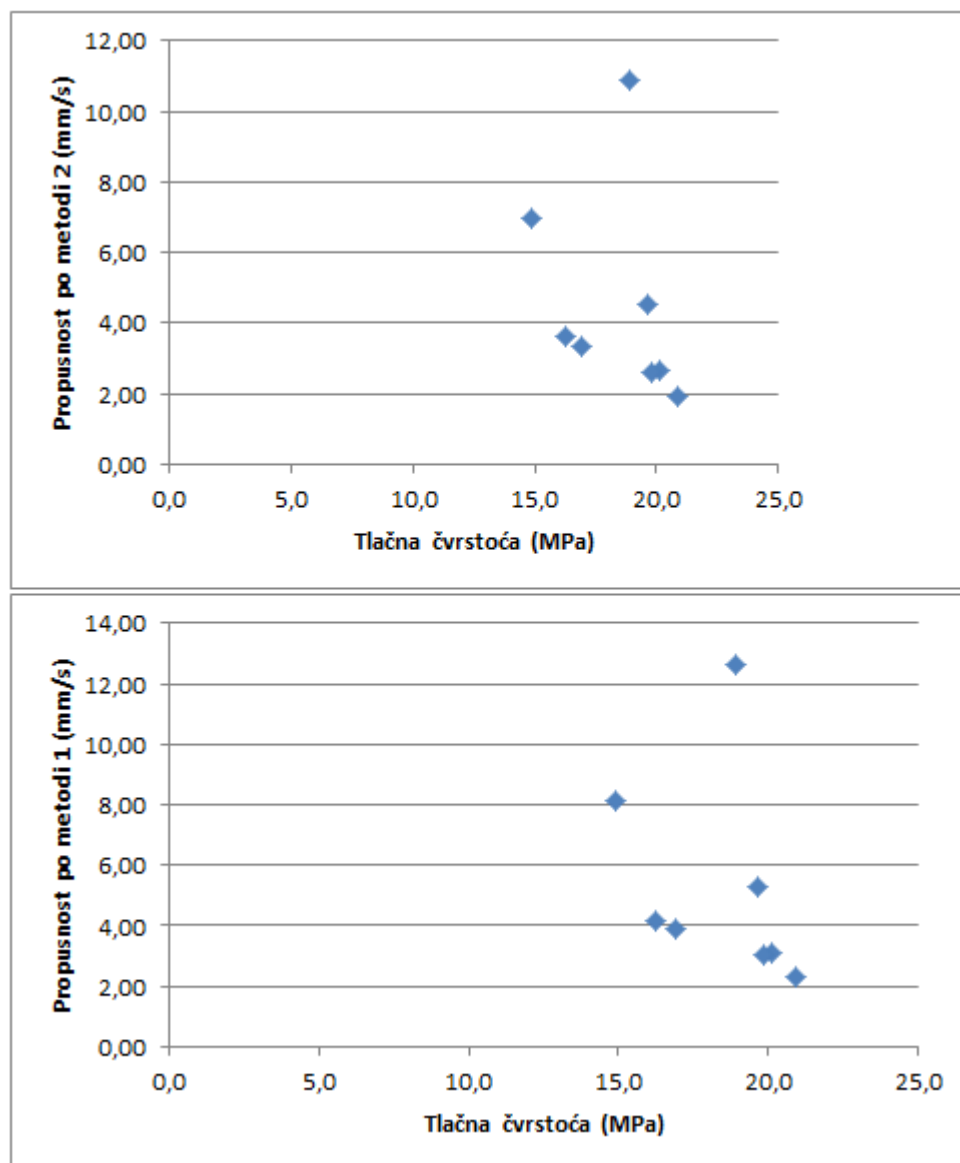


Slika 6.25 Veza između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem



### 6.2.8 Veza između tlačne čvrstoće i propusnosti

Tlačna čvrstoća se smanjuje kako propusnost raste. U ovom istraživanju veza između njih nije linearna.



Slika 6.26 Veza između tlačne čvrstoće i propusnosti

---

## 7 ZAKLJUČAK

Porozni betoni su pogodni za izgradnju slabije opterećenih površina s kojih se omogućuje odvodnja vode bez potrebe izgradnje drenažnih sustava. Cilj ovog istraživanja je bio postići dobru vodopropusnost i poroznost, a da pri tome beton ima i zadovoljavajuću čvrstoću.

U ovom istraživanju ispitana su svojstva poroznog betona izrađenog od drobljenog agregata različitih granulometrijskih sastava. U svrhu ovog istraživanja napravljeno je 8 mješavina poroznog betona te su se ispitivanja vršila u svježem i očvrsлом stanju.

Na temelju prethodnih ispitivanja, konzistencija svježeg poroznog betona se nije ispitivala metodom slijeganja već metodom oblikovanja kuglice u ruci. Pojedine mješavine nisu imale dobru konzistenciju jer je došlo do odvajanja zrna i cementnog mlijeka, te se nije mogla oblikovati kuglica na ruci.

Na očvrslim uzorcima su ispitana su sljedeća svojstva: poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća nakon 28 dana, vlačna čvrstoća cijepanjem, te veza među njima.

Sve mješavine zadovoljavaju kriterijima poroznosti. Pokazalo se da mješavine koje sadrže veća zrna agregata imaju bolju poroznost od mješavina sa sitnijim frakcijama agregata. Razlog tome je upotreba sitnijih zrna agregata koja popunjavaju praznine između krupnijih frakcija. Također, zaključeno je da leteći pepeo sa svojim svojstvima pozitivno utječe na propusnost poroznog betona.

Ispitivanje propusnosti se vršilo pomoću dvije metode. Sve mješavine s različitim granulometrijskim sastavima su dale različite rezultate koeficijenta propusnosti, ali sve zadovoljavaju tražene kriterije. Definirano je da najveću propusnost daju jednofrakcijske mješavine koje sadrže najveće zrno agregata veličine 11,2-16 mm. Time je zaključeno da se propusnost povećava s povećanjem veličine agregata. Na napravljenim mješavinama se pokazalo da propusnost raste kako se vodocementni faktor smanjuje. Kako i kod poroznosti, dodatak letećeg pepela povećava propusnost poroznog betona. Iako su rezultati kod pojedinih mješavina pokazali da ne postoji linearna veza između poroznosti i propusnosti, s porastom propusnosti raste i poroznost.

Kod prethodnih ispitivanja tlačne čvrstoće pokazalo se da na njezinu vrijednost znatno utječe sadržaj cementa i agregat. Kod ispitivanja tlačne čvrstoće, mješavina koje sadrži najmanju nazivnu frakciju 4-8 mm ima najveću tlačnu čvrstoću. Tlačna čvrstoća se dodatno povećava

---

dodatkom 15% sitnijih zrna veličine 2-4 mm, što se vidi na primjeru mješavine I-7. U ovom istraživanju je uočena linearna veza između tlačne čvrstoće i propusnosti s vrijednosti koeficijenta  $R=0,77$ . Tlačna čvrstoća se smanjuje kako propusnost raste.

Sve mješavine poroznog betona imaju malu vlačnu čvrstoću cijepanjem, što je i bilo očekivano. Kao i kod tlačne čvrstoće, na vlačnu čvrstoću znatno utječe vodocementni faktor. Najveću vlačnu čvrstoću ima mješavina koja sadrži mramorne dekorativne granule frakcije 7-12 mm i 15% agregata veličine 2-4 mm. Razlog tome je što sitnije čestice pozitivno utječe na vlačnu čvrstoću. Kao i kod tlačne čvrstoće, vlačna čvrstoća se povećava sa povećanjem sitnijeg agregata. Rezultati su pokazali da postoji linearna veza između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem.

---

## 8 LITERATURA

- [1] M. Vujica: Samozbijajući ekološki održivi beton; Diplomski rad, Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [2] L.K. Crouch, P.E.;Jordan Pitt, Ryan Hewitt: Aggregate effect on pervious portland cement concrete static moduls of elasicity, Journal of Materials in Civil Engineering, 2007
- [3] I. Križanić, J. Begić: Porozni betonski kolnik; Diplomski rad, Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2009.
- [4] Thn Chi Fu, Weichung Yeih, Jiang Yu Chang, Ran Huang: The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete, Taiwan, 2014.
- [5] M. Felja, K. Ćosić, I. Netinger: Primjena poroznog betona u kolničkim konstrukcijama, 2013.
- [6] V. Ukrainczyk: Beton, Struktura, svojstva, tehnologija, Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1994.
- [7] P. Krstulović: Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.
- [8] <https://www.scribd.com/doc/7253667/AGREGAT-VJEZBA-3>
- [9] C.Lian, Y. Zhuge: Optimum mix design of enchanced permeable concrete - An experimental investigation, Australija, 2010.
- [10] <http://www.cemex.com/>
- [11] [http://www.quarzwerke.at/downloads/DE\\_Katalog\\_2014.pdf](http://www.quarzwerke.at/downloads/DE_Katalog_2014.pdf)
- [12] <http://www.ekokuce.com/materijali/beton-sa-letecim-pepelom>
- [13] S. Mrakovčić, N. Čeh, V. Jugovac: Utjecaj granulometrijskog sastava na svojstva procjednog betona, Građevinar 66 (2014) 2 pp. 107-113.
- [14][http://info.grad.hr/res/gf\\_osoblje/1120041065/doc/1.%20mehanika%20tla%20i%20sti%20jena%20-%20prediplomski/052.5.\\_predavanje\\_mt.pdf](http://info.grad.hr/res/gf_osoblje/1120041065/doc/1.%20mehanika%20tla%20i%20sti%20jena%20-%20prediplomski/052.5._predavanje_mt.pdf)
- [15] [http://info.grad.hr/res/odbfiles/1716/mehanicka\\_svojstva-lab-vj-6.pdf](http://info.grad.hr/res/odbfiles/1716/mehanicka_svojstva-lab-vj-6.pdf)